



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

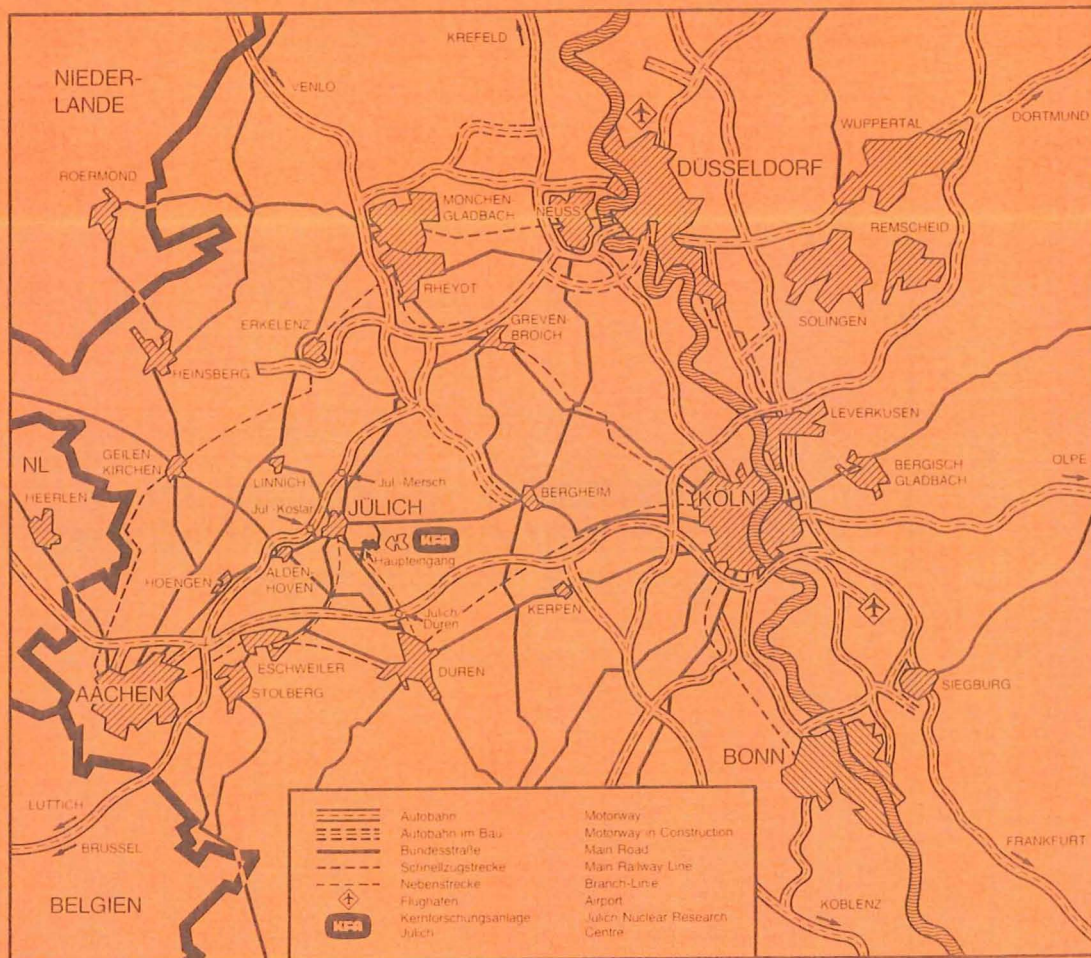
Projekt Spallations-Neutronenquelle

**VERMESSUNG DER STATISCHEN
EIGENSCHAFTEN EINES DREIDIMENSIONALEN
KOORDINATENMESSTISCHES**

von

W. Schiffer, A. Hardt

Jül-Spez-319
Juni 1985
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 319
 Projekt Spallations-Neutronenquelle Jül-Spez-319

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**VERMESSUNG DER STATISCHEN
EIGENSCHAFTEN EINES DREIDIMENSIONALEN
KOORDINATENMESSTISCHES**

von
W. Schiffer, A. Hardt

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Meßfaktoren	2
1.2 Meßverfahren	3
2. Beschreibung des Koordinatenmeßtisches	5
3. Die Steuerung des Tisches	9
3.1 Aufbau	10
3.2 Der Scheibenläufer-Motor	10
3.3 Regelung der Motoren	11
3.4 Kopplung zum Rechner	13
3.5 Verkabelung und Steckerbelegung	14
4. Grundlagen des Laserinterferometers	15
4.1 Interferenz	15
4.2 Michelson - Interferometer	17
4.3 Doppler - Effekt	18
4.4 Wollaston - Prisma	19
5. Das Laser - Meßsystem	21
5.1 Gerätebeschreibung	21
5.2 Meß -und Systemprinzip	22
5.3 Meßgrundlagen	24
5.3.1 Geradheitsmessung	24
5.3.2 Streckenmessung	27
5.3.3 Winkelmessung	28
5.3.4 Rechtwinkligkeitsmessung	29
5.4 Auflösung und Meßgenauigkeit	30
6. Meßaufbau	31
6.1 x-Achse	31
6.2 y-Achse	32
6.3 z-Achse	33
6.4 Meßaufbau der Rechtwinkligkeitsmessung	34

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
7. Meßdurchführung	35
7.1 Meßfehler	36
7.2 Einrichtverfahren	37
8. Meßergebnisse	39
8.1 Geradheit	39
8.2 Winkelabweichungen	47
8.3 Positionierungsunsicherheit	55
8.4 Abweichung von der Rechtwinkligkeit	59
8.5 Weitere Ergebnisse	60
9. Zusammenfassung	62
10. Anhang	63
11. Literaturverzeichnis	65

1. Einleitung

In der Kernforschungsanlage Jülich soll eine Spallationsneutronenquelle gebaut werden, bei der die die Spallation auslösenden Protonen in einem Linearbeschleuniger auf die notwendige Energie beschleunigt werden. In einer Targetstation treffen die Protonen auf ein rotierendes Target und setzen dort die Neutronen frei, die dann der experimentellen Nutzung zugeführt werden. /1/.

Bei vollständiger Fertigstellung der Anlage soll die Endenergie der Protonen 1100 MeV und die mittlere Strahlstromstärke 5 mA betragen, was einer Strahlleistung von 5 MW entspricht. Der Beschleuniger arbeitet mit einer Wiederholfrequenz von 100 Hz bei einer Protonenpulslänge von 250 μ sec, so daß ein gepulster Neutronenstrahl erzeugt wird.

Es wird ein thermischer Neutronenfluß im zeitlichen Mittel von $1,4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sowie $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im Puls angestrebt.

Da bei diesem Beschleunigersystem mit einem hohen mittleren Strahlstrom gearbeitet wird, müssen die Strahlverluste wegen möglicher Aktivierung und Strahlenschädigung des Materials sehr gering gehalten werden. Auch sind eventuelle Schädigungen durch lokale Überhitzungen der Strukturen nicht zu vernachlässigen.

Um eine präzise Strahlführung zu erreichen, wird deshalb eine Vielzahl von Fokussierungselementen, die als Multipolmagnete ausgebildet sind, entsprechend der ionenoptischen Auslegung des Beschleunigers entlang des Strahls verteilt /1/.

Die von diesen Magneten erzeugten Felder werden als erstes mit Hallproben ausgemessen, die mit Hilfe eines rechner-gesteuerten dreidimensionalen Koordinatenmeßtisches positioniert werden. Mit Hilfe dieser Meßergebnisse lassen sich aus Messungen der Profilparameter entsprechende Spezifikationen und Toleranzanforderungen ableiten, sowie Bearbeitungs -und Korrekturprozeduren angeben.

Da die Genauigkeit der Ortsbestimmung der Magnetmeßproben wesentlich die Toleranz der Ionenoptik und der Justierung beeinflusst, darf die wahre Position der Probe höchstens 0,05 mm von der geforderten abweichen.

In diesem Zusammenhang ist es die Aufgabe der vorliegenden Arbeit, die statische Positioniergenauigkeit dieses Koordinatenmeßtisches zu überprüfen.

1.1 Meßfaktoren

Um das statische Verhalten des Koordinatenmeßtisches vollständig erfassen und beurteilen zu können, werden die Bewegungen der einzelnen Achsen in mehrere Komponenten zerlegt, die getrennt vermessen werden.

Für jede Achse erhält man auf diese Weise fünf Freiheitsgrade. Diese sind die lineare Verschiebung, die Geradheit (horizontal und vertikal) und Winkelbewegungen (Schwenk -und Kippwinkel) der einzelnen Achsen entlang ihres Fahrweges. Zusätzlich wird ihre Rechtwinkligkeit zueinander bestimmt.

Die Abbildung 1 zeigt die für die Beurteilung der Geometrie des Tisches maßgebenden Faktoren.

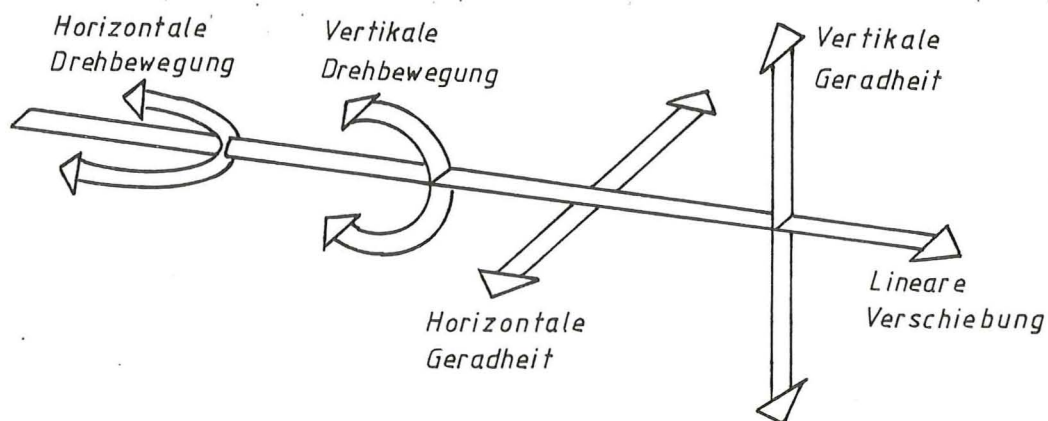


Abb.1: Freiheitsgrade einer Achse

Jedes dieser Merkmale trägt zur Positioniergenauigkeit an jedem Punkt innerhalb der Reichweite des Meßtisches bei und es lassen sich somit ggf. Korrekturfaktoren für die Positionen der Meßsonde ableiten.

Das Rechenprogramm, das während der Feldmessungen den Tisch steuert, wird die aus der Vermessung der statischen Eigenschaften erhaltenen Daten und die aktuellen Positionen verarbeiten, um eine exaktere Position der Proben zu errechnen.

1.2 Meßverfahren

Die Position der Probe soll, wie oben angegeben, mit einem Fehler kleiner als 0,05 mm reproduziert werden, d.h. es müssen Längenänderungen kleiner als 50 μm registriert werden können. Mit einem mechanischen Verfahren (z.B. Mikrometerschrauben) ist dies innerhalb der Meßgenauigkeit nur sehr schwer durchführbar.

Es ist heute Stand der Technik, Längenänderungen im Bereich von 0,001 mm mit Interferenzmessungen zu realisieren. Die nach diesem Prinzip arbeitenden Geräte sind in der Lage, Wegdifferenzen, die im Bereich der Wellenlänge des zur Interferenz gebrachten Lichtes liegen, zu messen.

Für die Vermessung der statischen Eigenschaften des Koordinatenmeßtisches wird deshalb ein Laserinterferometer verwendet, mit dem alle genannten Meßfaktoren erfasst und mit der erforderlichen Genauigkeit vermessen werden können.

2. Beschreibung des Koordinatenmeßtisches

Die Abbildung 2 zeigt eine dreidimensionale Darstellung des Tisches, aus der die Anordnung der Achsen und die im folgenden verwendeten Richtungsbezeichnungen ersichtlich sind.

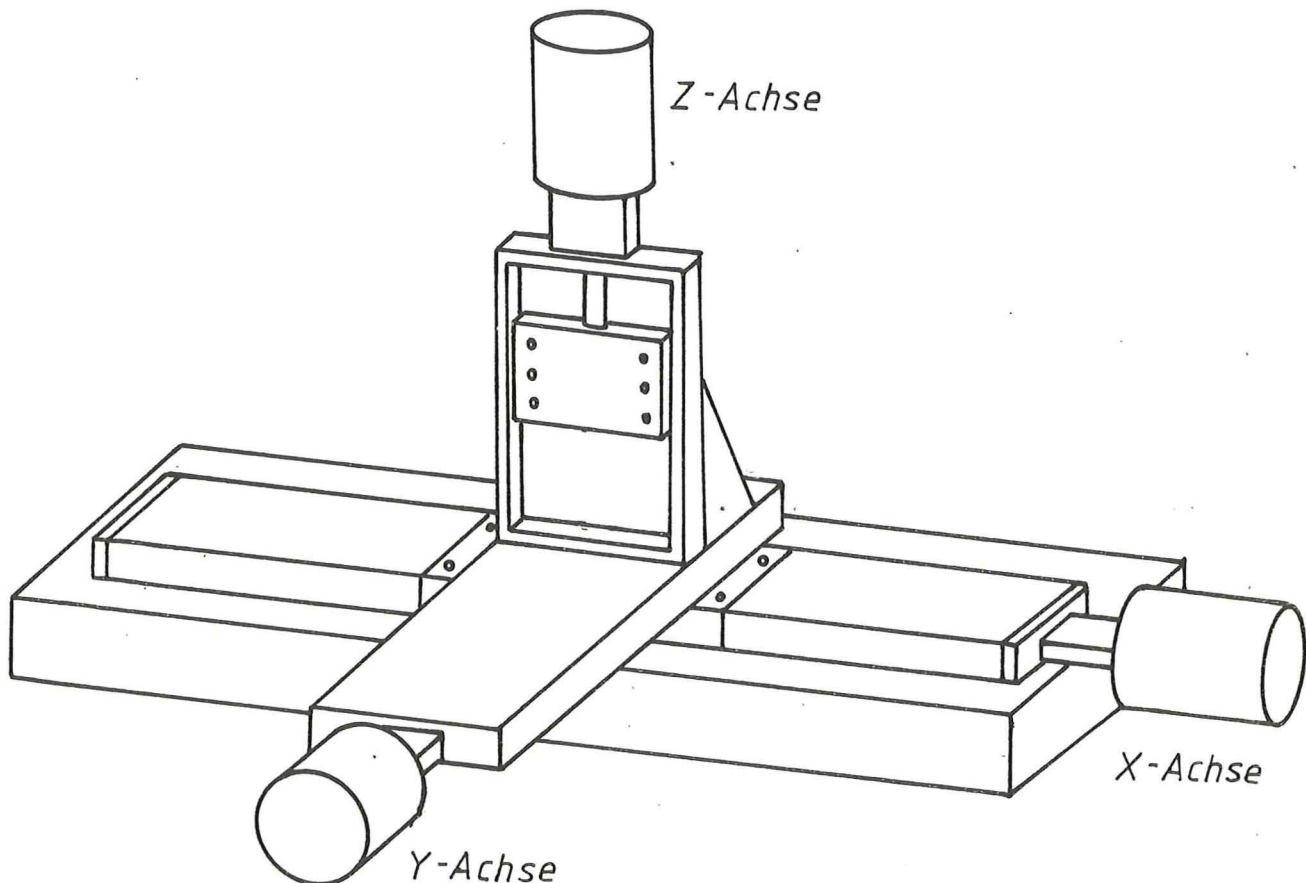


Abb.2: Koordinatenmeßtisch

Die x-Achse ist fest auf einer 150 mm dicken Granitplatte von genau spezifizierter Ebenheit montiert. Die Platte ist mit fünf Justierschrauben auf einem Stahlgestell befestigt, welches mit Beton ausgegossen wurde, um die Schwingungen des Tisches während des Betriebes zu verringern.

Die y-Achse ist auf dem beweglichen Schlitten der x-Achse so gelagert, daß die gesamte y-Achse mit der auf ihr fest angebrachten z-Achse in y-Richtung bewegt werden kann.

Auf dem beweglichen Schlitten der z-Achse wird eine 2 m lange Stange angebracht, an deren Ende sich die Magnetmeßprobe befindet.

Die drei Achsen stehen senkrecht aufeinander und werden von je einem Gleichstrommotor mit Spindeltrieb angetrieben.

Mit dieser Kombination kann jeder beliebige Raumpunkt innerhalb der Reichweite und der Genauigkeit der einzelnen Achsen angefahren werden.

Die Fahrstrecken haben folgende Längen:

x-Achse:	690 mm
y-Achse:	230 mm
z-Achse:	180 mm

Die Lagerung der Achsen besteht aus beweglichen Kugelschienen. Die festen und die fahrbaren Komponenten besitzen V-Nuten, in denen die Kugeln entlanglaufen.

Um die Position feststellen zu können, ist an jeder Achse ein optischer Lichtmaßstab angebracht.

Er besteht aus einem Glasmaßstab mit zwei übereinander angeordneten Strichgittern, die, wie Abb.3 zeigt, gegeneinander versetzt sind. Der Abstand der Striche beträgt 20µm.



Abb.3: Strichanordnung des Glasmaßstabes

Das Licht von zwei Leuchtdioden, welche den Glasmaßstab durchstrahlen, wird alle 20 μm unterbrochen, wenn sich der Maßstab bewegt. Diese Unterbrechung wird von einer Photozelle registriert und über eine Elektronik an einen Zähler weitergeleitet. Durch die zwei getrennten, 90° zueinander phasenverschobenen Signale wird das Vorzeichen der Anzeige bestimmt /2/.

Um nach dem Ausschalten der Steuerung oder nach einem Stromausfall die Zuordnung eines Meßwertes zur Achsenposition reproduzieren zu können, hat jeder Maßstab eine Referenzmarke. Sie befindet sich ungefähr in der Mitte der Fahrstrecken und beim Überfahren wird ein zusätzliches Signal erzeugt, das den Nullpunkt der Achse definiert.

Die Fahrstrecken der Achsen werden durch Endschalter begrenzt. Diese Schalter sind als induktive Näherungsschalter ausgeführt und benötigen keine mechanische Kopplung. Beim Überfahren der Endschalter ändert sich die magnetische Induktion. Dies wird vom Regler registriert und führt zur Abschaltung dieser Fahrrichtung. Der Motor kann dann nur noch in die entgegengesetzte Richtung gesteuert werden.

Die Abbildung 4 zeigt den Koordinatenmeßtisch mit einer Meßanordnung zur Streckenmessung. Im Hintergrund steht der Dipol, dessen Magnetfeld ausgemessen werden soll.

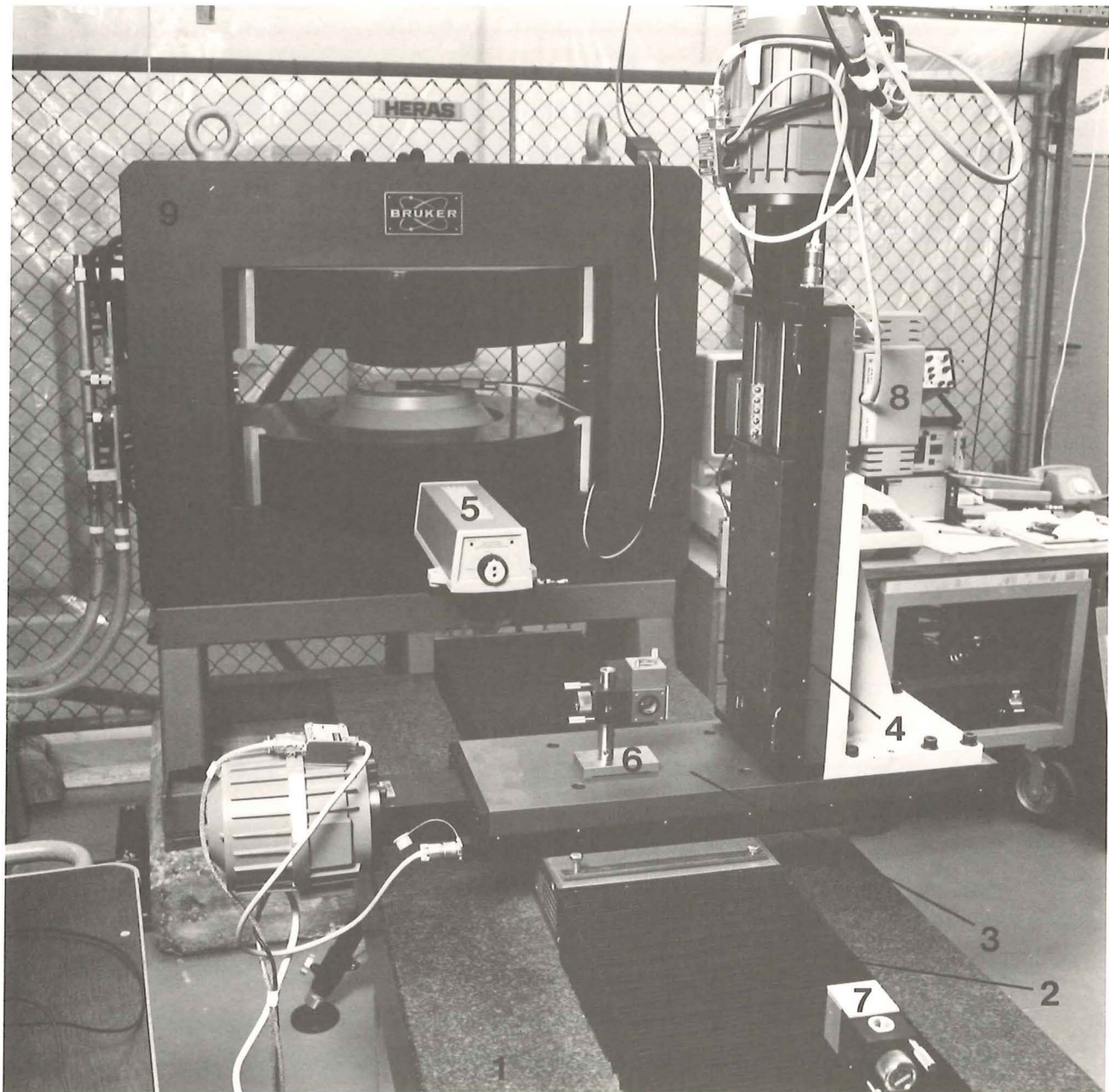


Abb.4: Koordinatenmeßtisch mit Meßaufbau

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| 1) Granitplatte | 6) Interferometer |
| 2) x-Achse | 7) Reflektor |
| 3) y-Achse | 8) Luftparameteraufnehmer |
| 4) z-Achse | 9) Magnet |
| 5) Laserkopf | |

3. Die Steuerung des Tisches

Die Abb.5 zeigt die Steuerungen der Achsen, den programmierbaren Positioniercontroller und das Anzeigegerät des Lasermeßsystems HP 5528 A.

Positionier-
controller

x-Achse

y-Achse

z-Achse

Anzeigegerät
des Lasers

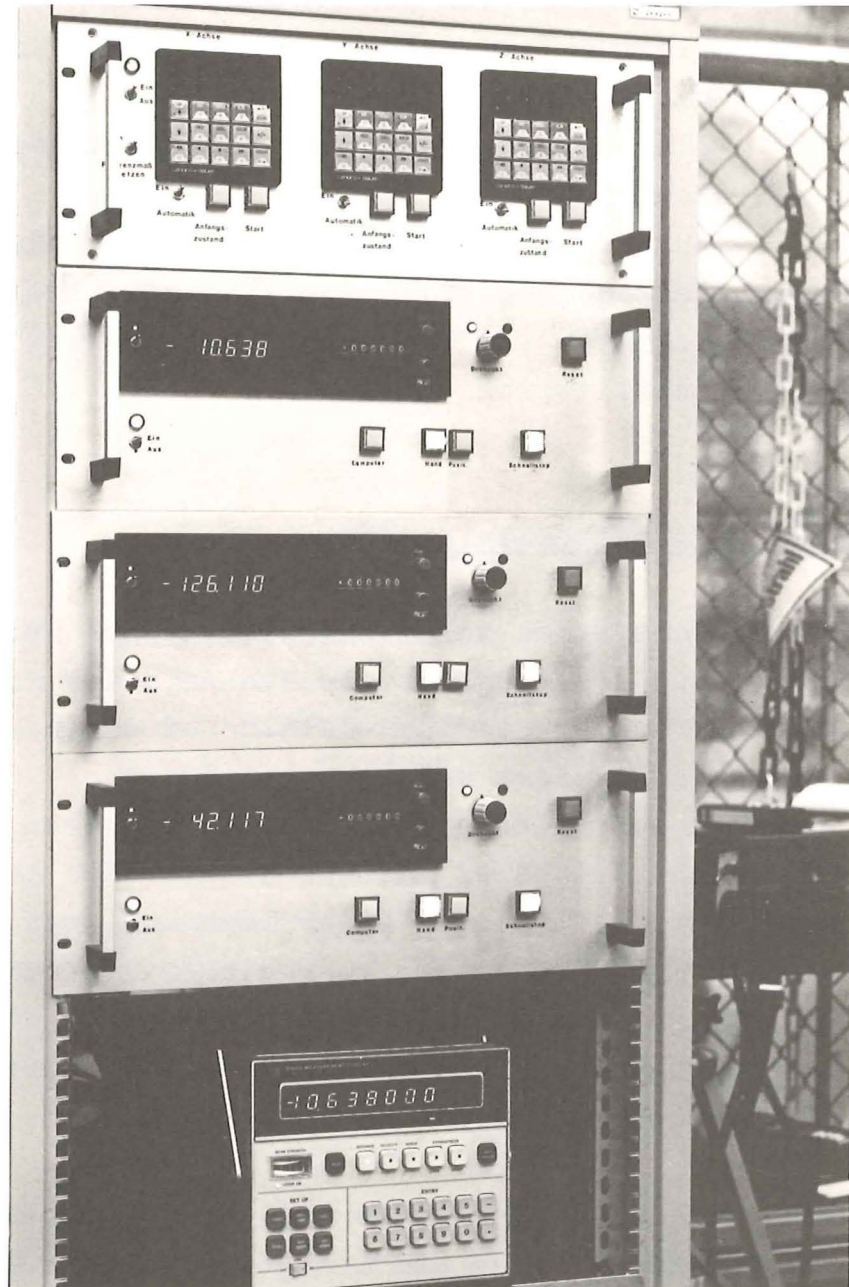


Abb.5: Steuerung der Achsen

3.1 Aufbau

Jeder Motor besitzt eine eigene Steuerung, die sich aus folgenden Komponenten zusammensetzt:

- Netztrafo zur Spannungsversorgung
- Drehzahlregler mit PI-Beschaltung
- Platinen zur Aufnahme der für die Schaltvorgänge notwendigen Relais
- Zähler zur Anzeige der vom Linearmaßstab gelieferten Position
- Anschlüsse für Computer, Motor, Endschalter, Linearmaßstab und einen Positioniercontroller
- Schalter und Taster zur Ansteuerung der Relais
- Ventilatoren zur Kühlung

3.2 Der Scheibenläufer-Motor

Die Grundlage des Scheibenläufer-Motors ist das " Barlowsche Rad ", das ursprünglich zum Nachweis der Kraftwirkung eines stationären magnetischen Feldes auf einen stromdurchflossenen Leiter konstruiert wurde.

Zwischen den Polen eines Permanentmagneten befindet sich ein leicht drehbares Rad aus Metall, das in Quecksilber eintaucht. Bei Anlegen einer Spannung zwischen Quecksilberbad und Radachse fließt in radialer Richtung ein Strom durch das Rad. Daraus resultiert eine Drehung, da die Elektronen in tangentialer Richtung wegen der auftretenden Lorentzkraft abgelenkt werden /5/.

Beim Scheibenläufer-Motor ist der Anker als Scheibe ausgeführt, die zwischen den Erregerspulen drehbar gelagert ist. Sie besteht aus Kunststoff, in den scheibenförmig Kupferdrahtwicklungen eingebettet sind, die radial nach außen verlaufen.

Hin -und Rückleiter liegen auf verschiedenen Seiten der Scheibe, die Stromzuführung erfolgt über Schleifbürsten. Die Leistung des Motors wird durch die Erregerfeldstärke und die Dicke der Läuferscheibe bestimmt /5/.

Diese leichte Bauweise bewirkt ein kleines Trägheitsmoment und auch bei geringen Drehzahlen einen ruckfreien Lauf. Die Welle kann an jeder beliebigen Stelle positioniert werden, da der Motor nicht zahnt und ein gleichmäßiges Drehmoment abgibt.

Ein großer Regelbereich mit linearem Verhalten, ein geringer Eingangswiderstand, schnelles Anlaufen und Bremsen sind weitere Kennzeichen des Motors /3/.

Wegen dieser günstigen Eigenschaften werden für die Positionierung der Achsen des Koordinatenmeßtisches Gleichstrom-Scheibenläufer-Motoren verwendet.

3.3 Regelung der Motoren

Die Abb.6 zeigt das vereinfachte Blockschaltbild der Drehzahlregelung:

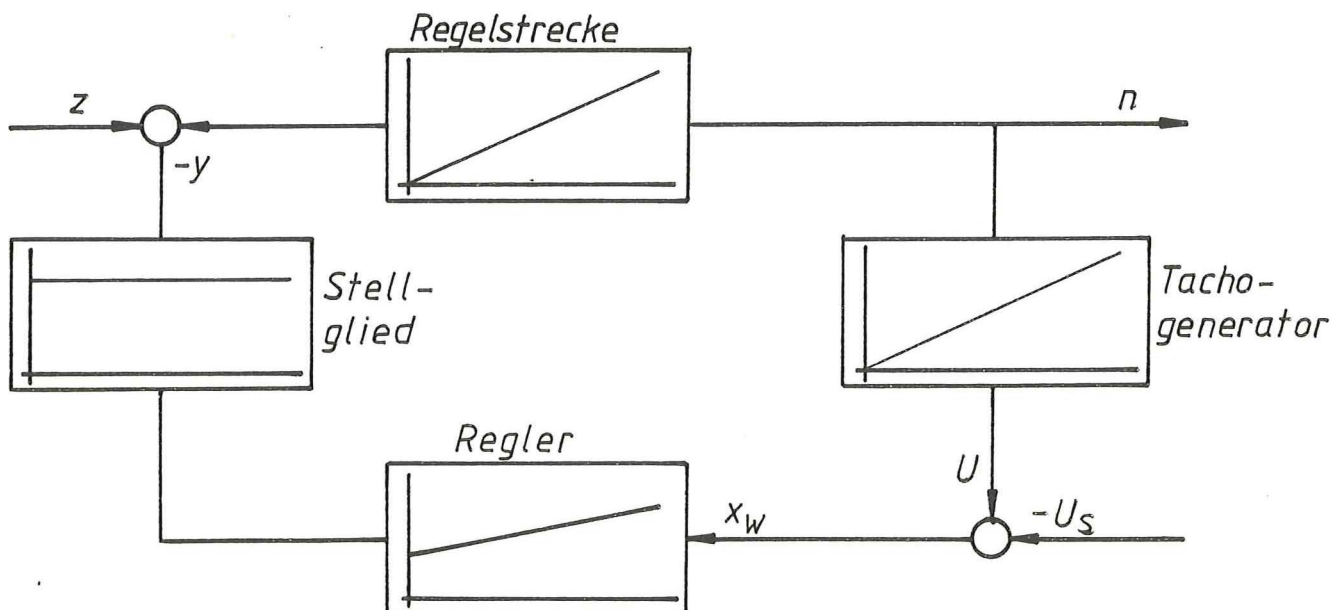


Abb.6: Blockschaltbild der Drehzahlregelung

Ein Tachogenerator als Meßumformer setzt die Drehzahl n in eine Gleichspannung um und gibt diese als Istwert U in den mit einer PI-Beschaltung versehenen Regelverstärker.

Der Sollwert U_S wird entweder bei Handbetrieb durch ein Potentiometer oder durch eine externe Steuerspannung vorgegeben, die vom Computer oder vom Positioniercontroller geliefert wird.

Der Verstärker führt ständig einen Spannungsvergleich zwischen Soll -und Istwert durch und gibt an seinem Ausgang eine Spannung ab, die die Höhe der Motordrehzahl bestimmt. Ändert sich diese durch äußere Einflüsse, wie Lastschwankungen, erhöhte Reibung, Netz -und Temperaturschwankungen, so erfolgt sofort eine Ausregelung durch den Verstärker.

Der Regler ist noch mit weiteren Steuerfunktionen ausgestattet:

- Mit einem Schnellstop-Taster kann der Motor aktiv abgebremst und dann sofort stromlos gemacht werden. Diese Funktion wird durch Drücken einer Reset-Taste wieder rückgängig gemacht.
- Beim Überfahren der Endschalter wird eine Drehrichtung abgeschaltet und der Motor kann dann nur in die andere Richtung umgesteuert werden.
- Der Regler verfügt noch über eine Strombegrenzung und eine Zeitabschaltautomatik, die den Motor bei Überschreiten einer vorwählbaren Stromschwelle nach einer ebenfalls vorwählbaren Zeit abschaltet /4/.

Auf der Bedienungseinheit (Frontplatte) lassen sich drei unterschiedliche Betriebszustände anwählen.

a) Handsteuerung

In diesem Betriebszustand wird die Sollspannung an einem Potentiometer auf der Frontplatte eingestellt.

b) Positioniersteuerung

Dieser Betriebszustand kann gewählt werden, wenn z. B. Positionen angefahren werden sollen. Er unterscheidet sich in der Steuerung vom Handbetrieb, da der Positioniercontroller für die Steuerung die Daten des Linearmaßstabes mitverwerten kann.

Eine ausführliche Beschreibung der Funktion des Positioniercontrollers ist Bestandteil einer anderen Arbeit /10/.

c) Computersteuerung

Dieser Betriebszustand wird gewählt, wenn die Achsen vom Computer gesteuert werden sollen.

Die Steuerungen der x -und y-Achse sind identisch. Der Antrieb der z-Achse enthält eine zusätzliche Bremse, um ein sicheres Anhalten zu gewährleisten. Diese Bremse ist nötig, da die z-Achse zu ihrer vom Antrieb gelieferten Beschleunigung noch der Erdbeschleunigung ausgesetzt ist. Deshalb besitzt diese Steuerung eine zusätzliche Schaltung, die die erforderliche Spannung zum Lösen der Bremse bereitstellt. Schnellstop und Endschalter sind mit der Bremse gekoppelt.

3.4 Kopplung zum Rechner

Zwischen die Steuerung des Koordinatenmeßtisches und dem Prozeßrechner ist ein Multiprogrammer geschaltet, der die Hauptkontrolleinheit für die Kommunikation mit dem Computer und für die gesamte Datenübertragung darstellt.

Er besitzt Anschlüsse zur Aufnahme von maximal 16 Input/Output Cards, deren Funktionen von einem HP-IB-Controller programmiert werden können.

Diese Karten besitzen Steckanschlüsse, so daß die Kapazität des Multiprogrammers der Anzahl der angeschlossenen Systemeinheiten angepaßt werden kann.

Die Output Karten entwickeln die durch die Programmanweisungen spezifizierte Datenmenge und leiten diese an die Steuerung weiter.

Die Input Karten empfangen die Daten von der Steuerung und sorgen dafür, daß diese Daten dem Rechner zur Verfügung stehen (z. B. Analog/Digital Wandler).

Der Multiprogrammer enthält zwei Mikroprozessoren, die alle Instruktionen entschlüsseln und ausführen sowie die gesamte Datenübertragung kontrollieren. Weiterhin enthalten sie Diagnoseprogramme für Selbsttests und einen zeitlich begrenzten Speicher für die Anweisungen und Daten.

Der Multiprogrammer versteht 32 verschiedene Anweisungen von einem angeschlossenen HP-IB-Controller. Sie beinhalten die Systemkontrolle, Befehle zur Datenübertragung, die Kontrolle der Karten und Instruktionen zur zeitlichen Abstimmung des Systems /11/.

3.5 Verkabelung und Steckerbelegung

Jeder Steuereinschub ist mit der zugehörigen Achse durch drei Kabel verbunden:

- 14-polig für Endschalter, Tachogenerator, Bremse
- 3-polig für die Ansteuerung des Motors
- 7-polig für den Linearmaßstab

Die Verbindung zum Multiprogrammer und zum Positioniercontroller erfolgt über ein 24-poliges bzw. über ein 7-poliges Kabel.

Die Steckerbelegung aller Anschlüsse geht aus dem Schaltplan im Anhang hervor.

4. Grundlagen des Laserinterferometers

4.1 Interferenz

Interferenzerscheinungen entstehen, wenn mindestens zwei kohärente Wellensysteme zusammentreffen. Kohärent bedeutet, daß die Wellen gleiche Frequenz haben und in einer festen Phasenbeziehung zueinander stehen.

Am Beispiel der Schwingung soll hier die Interferenz erklärt werden. Dazu wird nur die zeitliche Periodizität der Wellenbewegung betrachtet, während die räumliche Komponente der Wellengleichung vernachlässigt wird.

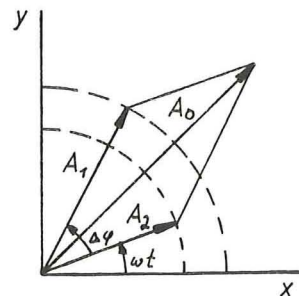
Verfolgt man die Überlagerung zweier gleichfrequenter Schwingungen

$$y_1 = A_1 \sin(\omega t + \Delta\varphi)$$

$$y_2 = A_2 \sin \omega t$$

im Zeigerdiagramm (Abb.7), erhält man für die resultierende Amplitude nach dem Kosinussatz [9]:

Abb.7: Zeigerdiagramm zweier gleichfrequenter Schwingungen



$$A_0^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos(\pi - \Delta\varphi)$$

Ist die Phasenverschiebung zwischen den Schwingungen $\Delta\varphi=0$, so wird die Gesamtamplitude maximal, da $\cos\pi=0$ ist:

$$A_0 = A_1 + A_2$$

Für $\varphi = \pi$ gilt:

$$A_0 = |A_1 - A_2|$$

Die Amplitude erreicht ihren kleinsten Wert.

Mathematisch kann diese Betrachtung auf Wellen übertragen werden:

Treffen zwei Lichtwellen gleicher Frequenz und Wellenlänge zusammen, so ist die Gesamtintensität maximal, wenn der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt.

Gangunterschiede von einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge ergeben entsprechende Minima der Intensität.

Stellt man interferierende Lichtwellen auf einem Schirm dar, ergibt sich ein Interferenzmuster mit abwechselnd hellen und dunklen Streifen.

Im allgemeinen können in der Optik keine Interferenzen zwischen zwei Lichtwellen beobachtet werden, die von verschiedenen Quellen stammen. Dies ist in der Inkohärenz der konventionellen Lichtquellen begründet. Sie läßt sich durch den Entstehungsmechanismus des normalen Lichtes erklären. Werden die Elektronen der Atome oder Moleküle durch Energiezufuhr in angeregte Zustände gehoben, so wird bei Rückkehr in den Grundzustand Energie in Form einer gedämpften Welle abgestrahlt. Diese kann näherungsweise als ein Wellenzug mit begrenzter Länge aufgefaßt werden. Die Lichtemissionen erfolgen statistisch, so daß die einzelnen Wellenzüge wechselnde Phasenkonstanten besitzen. Deshalb sind die von verschiedenen Punkten einer Lichtquelle abgestrahlten Lichtwellen zueinander inkohärent. Das gleiche gilt für verschiedene Lichtquellen.

Um Interferenzen erzeugen zu können, muß das von einem Punkt einer Quelle emittierte Licht in zwei Teilwellen zerlegt werden. Das geschieht entweder durch Ausblenden oder durch halbdurchlässige Medien.

Aber auch Lichtwellen, die von einem Emissionszentrum ausgehen, brauchen nicht unbedingt kohärent zu sein. Denn auch die von einem Emissionszentrum zeitlich hintereinander ausgestrahlten Wellenzüge haben eine statistische Phasenlage zueinander. Kohärent sind also nur Teilwellenzüge, die von einem einzigen Emissionsakt stammen. Dies bedingt, daß die Wegdifferenz zwischen zwei Wellen nicht größer sein darf als die Länge eines Wellenzuges, damit noch Interferenz auftreten kann. Die maximal zulässige Wegdifferenz wird als Kohärenzlänge bezeichnet.

Die hervorragende Lichtquelle zur Erzeugung von Interferenzen ist der Laser. Er erzeugt monochromatisches, kohärentes Licht mit Kohärenzlängen bis zu einigen Kilometern.

Beim Laserinterferometer wird der Laserstrahl durch Strahlteiler aufgespalten und die Teilstrahlen werden nach Durchlaufen der Meßstrecke zur Interferenz gebracht.

4.2 Michelson - Interferometer

Die Meßanordnungen zur interferometrischen Messung von Längen gleichen im Prinzip dem Michelson-Interferometer (Abb.8).

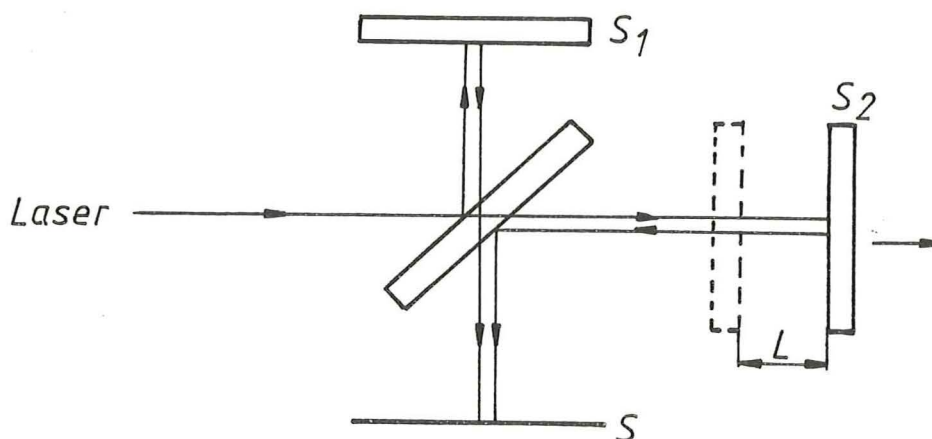


Abb.8: Interferometrische Längenmessung

Bei diesem Gerät wird der einfallende Laserstrahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten, welche gegeneinander um die zu messende Strecke L verzögert werden. Infolge der hohen zeitlichen Kohärenz der Laserstrahlung entsteht auch bei großen Wegdifferenzen auf dem Beobachtungsschirm S ein Interferenzmuster mit hellen und dunklen Streifen.

Bei einer Bewegung des Spiegels S_2 in Meßrichtung durchläuft die Intensität auf dem Schirm eine periodische Folge von Maxima und Minima.

Die Maxima wiederholen sich im Abstand einer ganzen Wellenlänge des verwendeten Lichtes.

Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Maxima elektronisch zu zählen und die Meßstrecke L in Einheiten von λ auszumessen /7/.

4.3 Doppler - Effekt

Soll auch die Geschwindigkeit des Spiegels bestimmt werden, so muß die Messung derart ausgeführt werden, daß der Laser eine Längenänderung pro Zeiteinheit mißt.

Das Prinzip dieser Meßmethode beruht auf dem optischen Dopplereffekt, der bei der Ausbreitung von Licht auftritt. Bewegen sich ein Beobachter und eine Lichtquelle relativ zueinander, so registriert der Beobachter eine Frequenzverschiebung /7/:

$$f' = f_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad \text{für } v \ll c$$

f' = Frequenz, die ein Beobachter mißt, der sich relativ zur Quelle der Frequenz f_0 bewegt

v = Relativgeschwindigkeit

c = Lichtgeschwindigkeit

Durch Umformen der Gleichung erhält man mit $f' = f_0 + \Delta f$:

$$\Delta f = f_0 \cdot \frac{v}{c} \quad \text{für } v \ll c \quad (1)$$

Wird nun aus dem auftretenden Interferenzmuster die Anzahl der in der Zeiteinheit verbeilaufenden Maxima bestimmt, so entspricht dieser Wert einer Frequenz.

Für die Geschwindigkeit ergibt sich nach Umformen der Gleichung (1):

$$v(t) = \frac{c}{f_0} \cdot \Delta f(t) \quad (2)$$

Die in dieser Zeit durchlaufene Strecke ist durch folgende Gleichung bestimmt:

$$\begin{aligned} s(t) &= \int_0^t v(t) dt \\ s(t) &= \frac{c}{f_0} \int_0^t \Delta f(t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

4.4 Wollaston - Prisma

Das Wollaston - Prisma ist nicht von grundsätzlicher Bedeutung für die Laserinterferometrie. Da es jedoch bei einer im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messung Anwendung findet, soll seine Funktion kurz erklärt werden.

Das Wollaston - Prisma ist ein Prisma, das einen einfallenden Strahl in zwei zueinander senkrecht polarisierte Anteile zerlegt, die es unter entgegengesetzt gleichen Winkeln α verlassen.

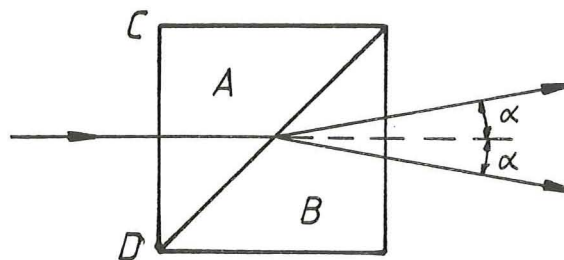


Abb.9: Strahlenverlauf im Wollastonprisma

Das Prisma besteht aus zwei mit ihren Basisflächen verkitteten rechtwinkligen Calcitprismen. Beim Prisma A liegt die optische Achse in der Zeichenebene parallel CD, während sie beim Prisma B senkrecht zur Zeichenebene verläuft (Abb.9)..

Das einfallende Licht spaltet im ersten Prisma in einen ordentlichen und einen außerordentlichen Strahl auf, die senkrecht zueinander polarisiert sind. Sie pflanzen sich bis zur Kittstelle in ursprünglicher Richtung, aber mit unterschiedlicher Geschwindigkeit fort.

Die ordentliche Komponente wird nach dem Übergang ins zweite Prisma vom Einfallslot weggebrochen, da sie hier mit größerer Geschwindigkeit läuft. Die außerordentliche Komponente wird wegen ihrer kleineren Geschwindigkeit zum Einfallslot hingebrochen.

Dadurch kommt bei dieser Prismenanordnung die große räumliche Trennung der beiden Strahlenbündel zustande /6/.

5. Das Laser - Meßsystem

Alle für diese Arbeit notwendigen Messungen wurden mit diesem System durchgeführt. Deshalb werden hier kurz seine Komponenten vorgestellt und die grundsätzliche Funktionsweise erklärt.

5.1 Gerätebeschreibung

Das Meßsystem setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- a) Das Anzeigegerät stellt die Überwachungs -und Anzeigeeinheit dar, versorgt den Laserkopf mit der notwendigen Energie und wandelt die empfangenen Meßinformationen in Längenmaße um. Außerdem enthält es die Anschlüsse für zusätzliche Geräte (HP-Rechner und/oder Plotter) und für Luftparameter -und Werkstofftemperaturaufnehmer. Die Messung von Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchte ist erforderlich, weil sich mit diesen Größen auch die Lichtgeschwindigkeit ändert. Durch Messung der Werkstofftemperatur der zu vermessenden Maschine kann die Wärmeausdehnung des Materials berücksichtigt werden.
- b) Der Laserkopf enthält die Laserröhre, die den Laserstrahl erzeugt, und den Meßempfänger, in den der Strahl von den optischen Geräten reflektiert wird.
- c) Optische Zubehörteile (Interferometer, Reflektoren) sind erforderlich, um Messungen durchführen zu können.
- d) Sonstige Teile dienen zur Montage der optischen Geräte an das Meßobjekt und zu deren Justierung.

5.2 Meß -und Systemprinzip

Ein Helium - Neon Gaslaser erzeugt einen kohärenten Laserstrahl. In einem zylindrischen Permanentmagneten entstehen daraus durch Zeeman - Aufteilung zwei Strahlen, die sich in ihrer Frequenz um etwa 1,5 bis 2,0 MHz unterscheiden und die gegenläufig zirkular polarisiert sind /8/.

Die Strahlen, die den Laserkopf verlassen, müssen aber senkrecht zueinander linear polarisiert sein, damit die Komponenten in den ebenfalls polarisierten Strahlteilern der Interferometer entsprechend getrennt werden können. Außerdem soll vermieden werden, daß sich die Strahlen beim Durchlaufen der Meßstrecke überlagern.

Die zirkulare Polarisierung wird deshalb in eine lineare umgewandelt, indem der Strahl durch geeignete Polarisationsfilter hindurchgeführt wird.

Ein Teil der Strahlen wird über einen Strahlteiler im Laserkopf abgezweigt und dient als Bezugsgröße für die Laserregelung und für die Berechnung der Frequenzdifferenz des reflektierten Meßstrahls.

Während einer Messung trifft der Laserstrahl auf ein Interferometer, durchläuft die Meßstrecke bis zum Reflektor und wird von diesem zurückgesandt. Der Meßempfänger im Laserkopf wird eine doppler - verschobene Frequenzänderung feststellen, wenn eine Relativbewegung zwischen den optischen Geräten stattgefunden hat.

Meß -und Bezugsstrahl gelangen auf getrennte Meßempfänger. Dort interferieren die Teilstrahlen und aus dem auftretenden Interferenzmuster wird die Anzahl der in der Zeiteinheit auftretenden Wellenlängen bestimmt.

Man erhält für Bezugs -und Meßstrahl getrennte Zählergebnisse, die im Anzeigegerät voneinander subtrahiert werden. Mit der so erhaltenen Frequenzdifferenz werden die für die gewählte Meßart notwendigen Berechnungen durchgeführt und das Ergebnis auf der Anzeige dargestellt /8/.

5.3 Messgrundlagen

In diesem Abschnitt sollen die wesentlichen Grundlagen für die durchgeführten Messungen und deren Auswertung dargelegt werden. Ebenso werden der Aufbau und die Funktionsweise der optischen Geräte erklärt.

5.3.1 Geradheitsmessung

Die Geradheit wird als vertikale und horizontale Bewegung senkrecht zur Meßachse entlang des Fahrweges der einzelnen Achsen gemessen. Zur Durchführung der Messungen werden ein Geradheitsinterferometer, ein Geradheitsreflektor und nach Bedarf auch ein Geradheitsparallelreflektor verwendet.

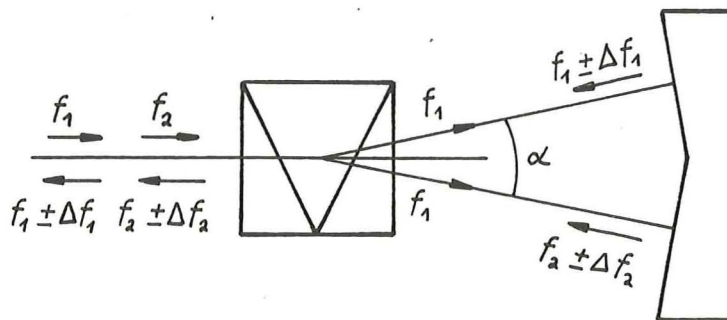


Abb.10: Geradheitsmessung

Das Interferometer teilt den Laserstrahl in zwei Komponenten auf, die auf die zwei starr montierten, in einem bestimmten Winkel zueinander stehenden Planspiegel des Reflektors treffen. Die Aufteilung der Strahlen geschieht in einem Wollastonprisma, das für die verschiedenen Polarisations-ebenen unterschiedliche Brechungsindizes aufweist (Abb.10).

Die Strahlen zwischen Interferometer und Reflektor haben am Anfang eine bestimmte unterschiedliche Länge. Bewegt sich eines der optischen Geräte in der Zeichenebene senkrecht zur optischen Achse, ändert sich die relative Länge der beiden Strahlwege. Die zwei vom Geradheitsreflektor reflektierten Strahlen vereinigen sich im Prisma an der gleichen Stelle, an der der Strahl aus dem Laserkopf geteilt wurde. Der reflektierte Strahl läuft dann im aus-tretenden Strahl in den Laserkopf zurück.

Die Summe der Schwebungen ist: $2 D \sin \alpha$

Aus dieser Gleichung wird die genaue Verschiebung D im Anzeigegerät elektronisch berechnet /8/.

Die wahre Geradheitsabweichung wird nicht direkt auf der Anzeige dargestellt, sondern sie muß aus den Meßwerten berechnet werden, da zwischen der Linie Laser - Interferometer - Reflektor und dem wahren Fahrweg der Achse ein sogenannter Fluchtungsfehler (Slope) besteht (Abb.11).

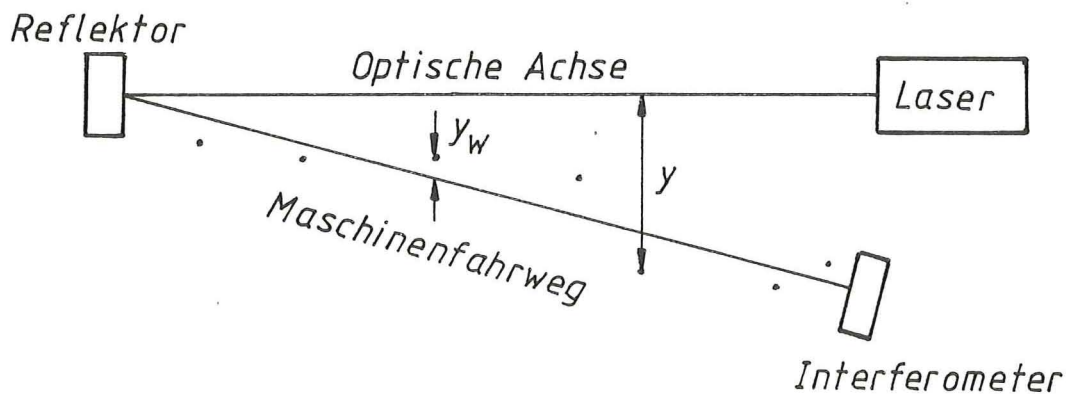


Abb.11: Fluchtungsfehler

Dieser Fehler kommt dadurch zustande, weil der Laser nicht genau parallel zur Meßachse ausgerichtet werden muß. Der angezeigte Wert y gibt deshalb die Abweichung der Meßpunkte von der optischen Achse an (Abb.11).

Der Fluchtungsfehler wird kompensiert, indem eine Anpassungsgerade durch die Meßpunkte nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt wird und dann die wahren Geradheitsabweichungen aus der Differenz zu den Meßwerten errechnet werden.

Dieser Rechenweg soll im folgenden dargestellt werden /8/:

Gegeben sind: Meßwerte y

Positionen x

Anzahl der Meßpunkte N

(Summiert wird jeweils über $i=1$ bis N)

Für die Steigung gilt:

$$m = \frac{\sum x \cdot \sum y - N \cdot \sum xy}{(\sum x)^2 - N \cdot \sum x^2} \quad (4)$$

Achsenabschnitt:

$$b = \frac{\sum x \cdot \sum xy - \sum y \cdot \sum x}{(\sum x)^2 - N \cdot \sum x^2} \quad (5)$$

Jetzt läßt sich für jede Position x der Wert y_s der Anpassungsgeraden bestimmen:

$$y_s = m \cdot x + b \quad (6)$$

Die wahre Geradheitsabweichung ergibt sich aus der Differenz der Sollwerte zu den Meßwerten:

$$y_w = y - y_s \quad (7)$$

5.3.2 Streckenmessung

Mit der Anordnung der optischen Geräte für die Streckenmessung wird die lineare Verschiebung in Achsenrichtung überprüft.

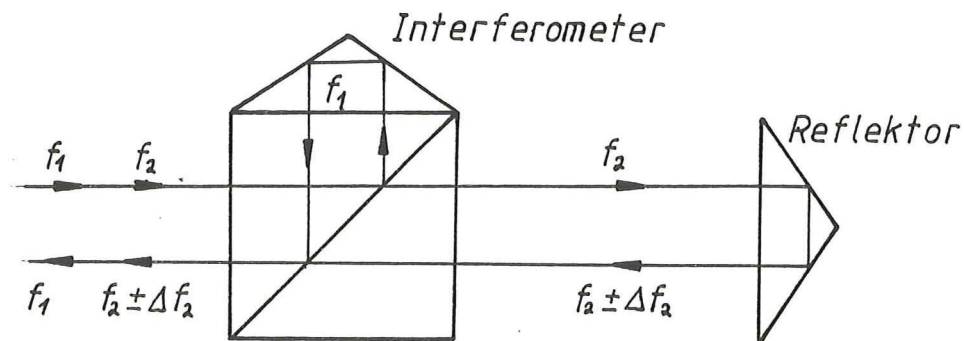


Abb.12: Streckenmessung

Das Linear - Interferometer enthält einen polarisierten Strahlteiler, der die ebenfalls polarisierten Komponenten des eintretenden Laserstrahls voneinander trennt.

Der Reflektor ist eine geschliffene Glaspyramide, die den Strahl immer genau parallel reflektiert.

Während der Strahl f_2 direkt zum Reflektor gesandt wird, wird der Strahl f_1 abgezweigt und durchläuft eine feste Meßstrecke (Abb.12). Bei einer Relativbewegung zwischen Interferometer und Reflektor entsteht eine Doppler - Verschiebung der Frequenz des reflektierten Strahls von Δf_2 . Das vom Interferometer eintreffende Signal mit $(f_1 - f_2 \pm \Delta f_2)$ wird im Anzeigegerät mit dem Bezugssignal $(f_1 - f_2)$ verglichen und daraus Δf_2 ermittelt /8/.

Die Differenz wird dann nach Gleichung (3) in eine Strecke umgerechnet und angezeigt.

5.3.3 Winkelmessung

Mit dem Laser werden bei jeder Achse zwei Winkelbewegungen gemessen:

- die vertikale Drehbewegung (Kippwinkel)
- die horizontale Drehbewegung (Schwenkwinkel).

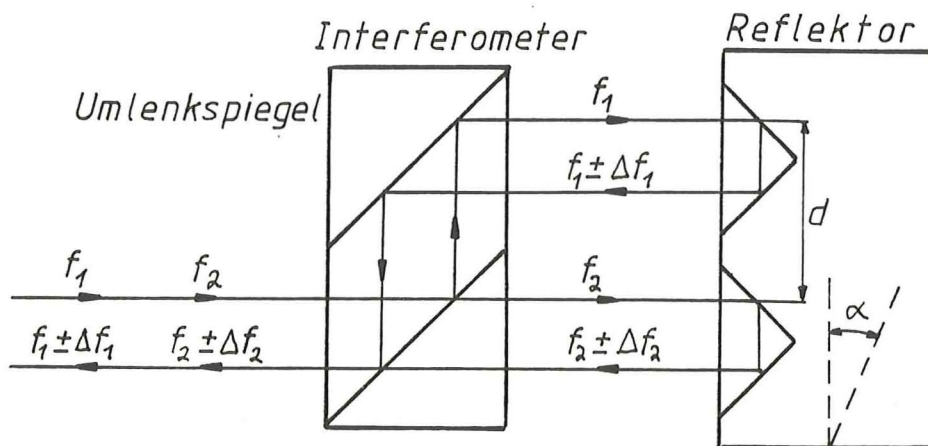


Abb.13: Winkelmessung

Das Winkelinterferometer ist ein Linearinterferometer mit einem darüber angeordneten Umlenkspiegel. In ihm wird der Laserstrahl in die Komponenten f_1 und f_2 aufgespalten, die dann auf den Winkelreflektor treffen. Dieser besteht aus zwei in einem genau bekannten Abstand d voneinander angeordneten Parallelreflektoren (Abb.13).

Zu Anfang besteht zwischen den beiden Strahlen ein bestimmter Längenunterschied und der Winkel wird zu Null angenommen. Bei einer Drehung eines der optischen Geräte ändert sich die relative Länge der beiden Strahlwege. Daraus resultiert eine Frequenzänderung der reflektierten Strahlen.

Die Winkeländerung wird dann im Anzeigegerät aus der neuen Frequenz und dem Abstand der parallelen Strahlen berechnet /8/.

Bei einer Drehung des Reflektors um den Winkel α verkürzen oder verlängern sich die Strahlen f_1 und f_2 um die Strecken s_1 und s_2 .

Ihre Längen können nach Gleichung (3) berechnet werden:

$$s = \frac{c}{f_{00}} \int_0^t \Delta f(t) dt$$

Setzt man die Differenz der Strecken ins Verhältnis zum Abstand d der Strahlen, ist das der Tangens des Winkels α :

$$\tan \alpha = \frac{s_1 - s_2}{d} \quad (8)$$

5.3.4 Rechtwinkligkeitsmessung

Die Rechtwinkligkeitsmessung besteht aus zwei Geradheitsmessungen, die senkrecht zueinander mit einem ortsfesten Geradheitsreflektor durchgeführt werden. Im Schnittpunkt der Achsen steht ein Winkelspiegel, der den Laserstrahl entsprechend umlenkt.

Die Abweichung von der Rechtwinkligkeit ergibt sich aus dem Vergleich der Winkel der Fluchtungsfehler (Abb.14).

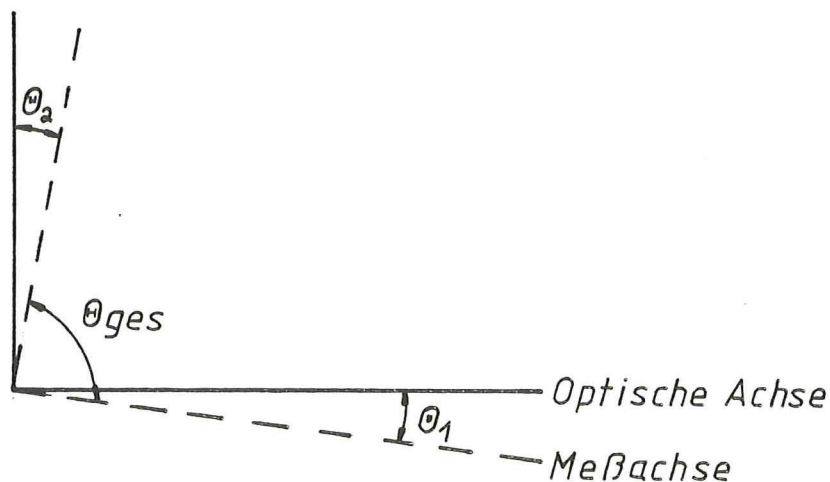


Abb.14: Rechtwinkligkeitsmessung

Der Wert der Abweichung von der Rechtwinkligkeit wird auf folgende Weise berechnet /8/:

a) Steigung m nach Gleichung (4) für jede Achse berechnen

b) Für den Steigungswinkel gilt:

$$\Theta = \arctan(m \cdot 10^{-6}) \cdot 3600 \text{ Bogensekunden} \quad (9)$$

c) Gesamtwinkel zwischen den Achsen:

$$\Theta_{\text{ges}} = 324000'' + \Theta_1 - \Theta_2 + F \quad (10)$$

d) Rechtwinkligkeitsabweichung:

$$\Theta_1 - \Theta_2 + F \quad (11)$$

F = Fehler des Winkelspiegels ($-0,46''$)

Θ_1 ist immer der Steigungswinkel der ersten und Θ_2 der Steigungswinkel der zweiten Meßachse.

5.4 Auflösung und Meßgenauigkeit

Meßverfahren	Auflösung	Genauigkeit
Streckenmessung	0,1 μm	0,1 μm
Winkelmessung	1"	$\pm 0,2\%$ der Anzeige $\pm 0,05''/\text{m}$
Geradheit	0,1 μm	0,4 $\mu\text{m}/\text{m}$
Rechtwinkligkeit	0,1 μm	0,5"

6. Meßaufbau

Die Art und der Ort der Befestigung der optischen Geräte an den einzelnen Achsen sind bei der Geradheits-, Strecken- und Winkelmessung im Prinzip gleich. Der für die jeweilige Messung erforderliche Reflektor und das Interferometer müssen allerdings ausgetauscht und neu justiert werden.

6.1 x-Achse

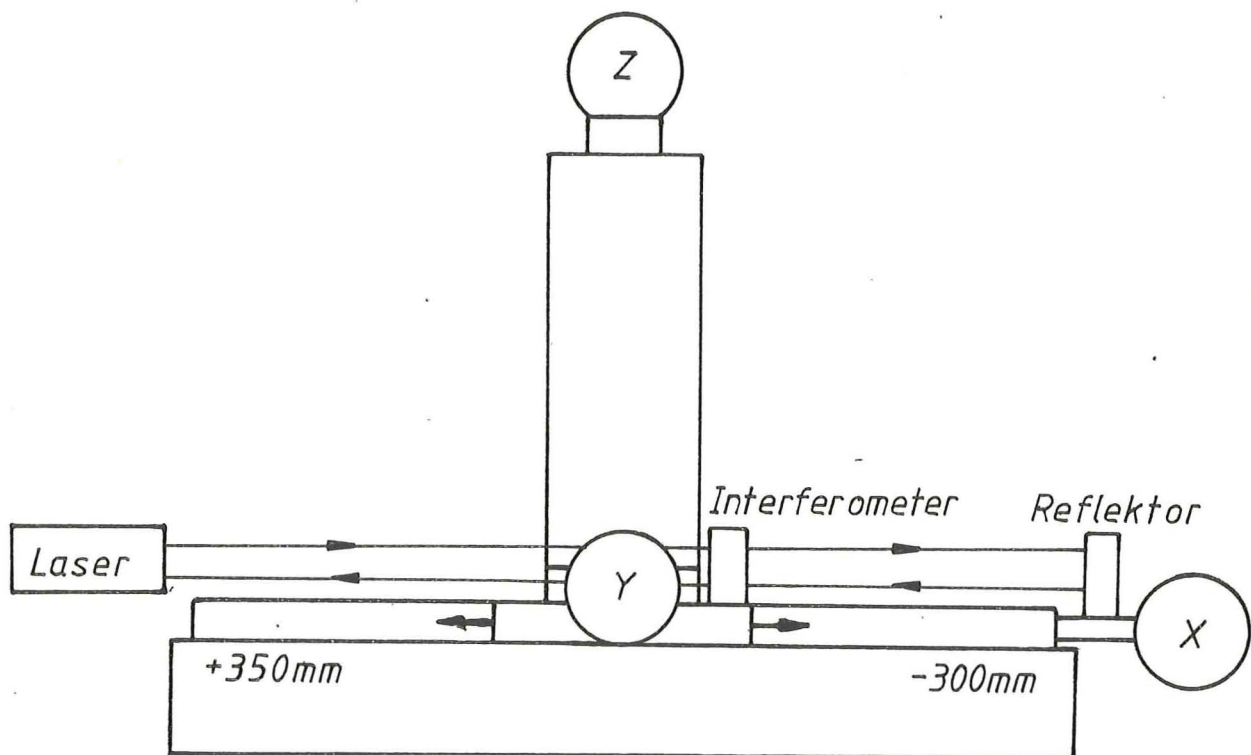


Abb.15: Meßanordnung zur Vermessung der x-Achse

Der Reflektor ist fest am Steg angebracht, der den Motor mit der x-Achse verbindet. Das Interferometer ist auf dem Schlitten befestigt, der sich in x-Richtung bewegt (Abb.15). Mit dieser Meßanordnung werden die Geradheitsabweichungen und die Winkelbewegungen des fahrbaren Teils gemessen, auf dem die gesamte Anordnung der y,z-Achsen angebracht ist.

6.2 y-Achse

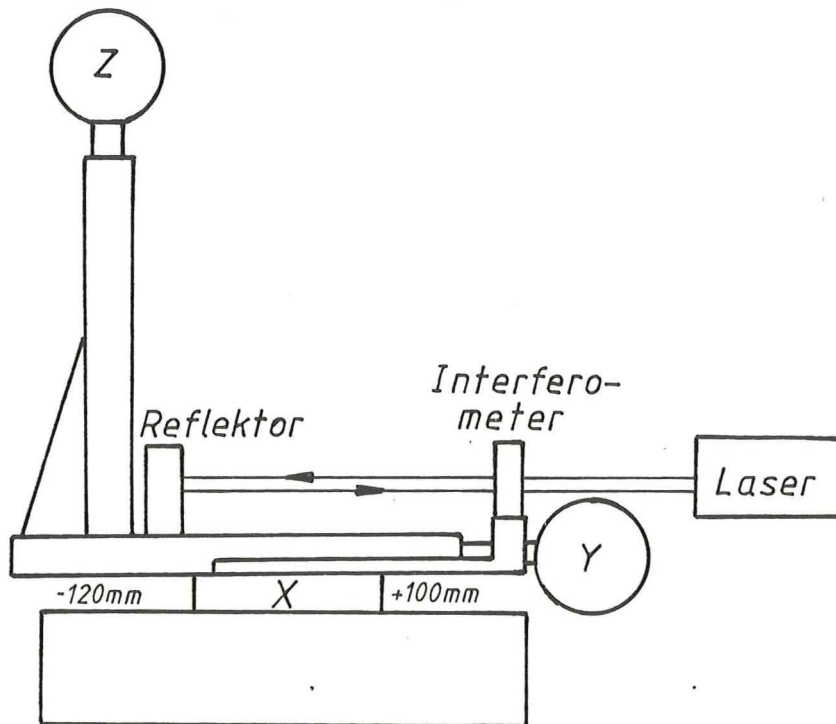


Abb.16: Meßanordnung zur Vermessung der y-Achse

Da die y-Achse als Ganzes fährt, mußte eine Halterung konstruiert werden, die zur Aufnahme des feststehenden optischen Gerätes dient.

Für diesen Zweck wurde aus Winkeleisen ein Bügel angefertigt, der auf dem Schlitten der x-Achse festgeschraubt wird und unter dem sich die y-Achse hindurchbewegt (Abb.16).

Das Interferometer wird auf dem Bügel befestigt und der Reflektor auf der y bzw. z-Achse, so daß mit diesem Aufbau die Geradheitsabweichungen und die Winkelbewegungen relativ zur x-Achse gemessen werden.

6.3 z-Achse

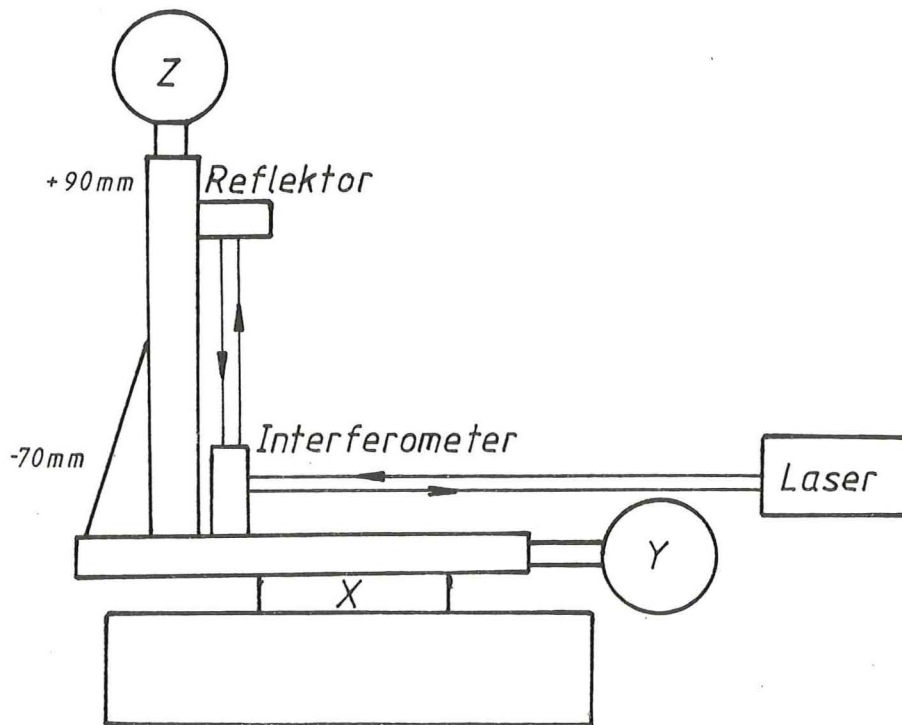


Abb.17: Meßanordnung zur Vermessung der z-Achse

Bei diesem Meßaufbau in der Vertikalen steht das Interferometer so auf der y-Achse, daß es den Laserstrahl um 90° umlenkt.

Der Reflektor wird auf dem in z-Richtung beweglichen Schlitten befestigt, so daß dessen Geradheitsabweichungen und Winkelbewegungen gemessen werden.

6.4 Meßaufbau der Rechtwinkligkeitsmessung

Die Anordnung der optischen Geräte, die zur Rechtwinkligkeitsmessung notwendig sind, ist im Prinzip in den drei Ebenen gleich. Deshalb soll hier nur der Meßaufbau für die x, z - Ebene aufgezeigt werden (Abb.18).

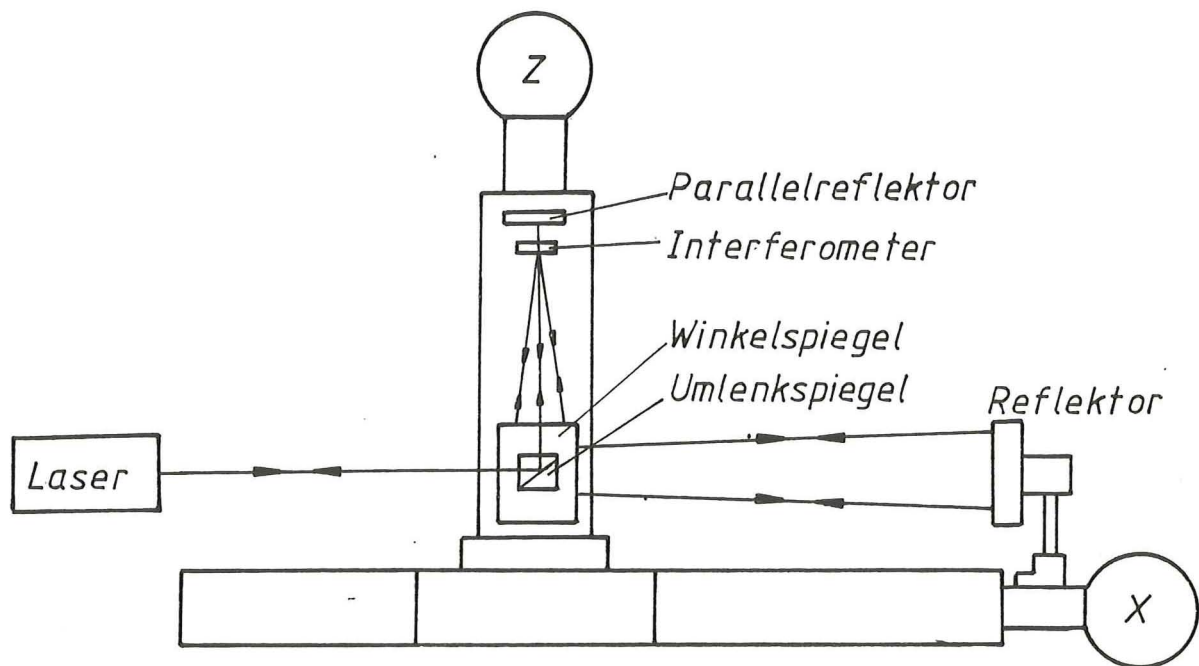


Abb.18: Meßanordnung zur Rechtwinkligkeitsmessung in der x, z - Ebene

7. Meßdurchführung

Der Meßablauf läßt sich in folgende Schritte zerlegen:

- Aufbauen der optischen Geräte.
- Ausrichten und Einjustieren des Lasers auf den Fahrweg der zu vermessenden Achse und der Optik nach der Visiermethode
- Fahren des Interferometers oder des Reflektors und Aufzeichnung der Meßwerte
- Eingabe der Werte in den Rechner und Auswertung
- Graphische Darstellung mit Plotter

Alle Messungen finden zwischen folgenden Positionen statt:

	Meßabstand
x-Achse: -350 mm bis 300 mm	50 mm
y-Achse: -120 mm bis 100 mm	10 mm
z-Achse: -.70 mm bis 90 mm	10 mm

Um den Meßablauf zu vereinfachen, werden die gewünschten Meßpositionen in einen programmierbaren Positioniercontroller eingegeben und der Reihe nach abgefahren.

Ein besonderes Verfahren, das Linearverfahren, wird für die Überprüfung der Positioniergenauigkeit angewandt:

Verschiedene Sollpositionen werden in mehreren Durchläufen aus zwei Richtungen der Reihe nach angefahren und die Abweichungen von der Sollposition aufgezeichnet.

Die Anfahrrichtung ist insofern von Bedeutung, da sich mit dieser auch die gemessenen Abweichungen ändern.

Dadurch, daß mehrere Meßreihen gefahren werden, ergibt sich ein Wert für den Fehler, mit dem die Positionen reproduzierbar angefahren werden können.

Die Rechtwinkligkeitsmessung unterscheidet sich von den anderen Messungen und wird auf folgende Weise durchgeführt:

Vor Beginn der Messung müssen die Vorzeichen der Winkel der Fluchtungsfehler beider Achsen festgelegt werden, da dadurch wesentlich der Wert der Rechtwinkligkeit bestimmt wird.

Dann wird als erstes die Geradheit der Achse vermessen, die senkrecht zum Reflektor liegt. Nach Entfernen des Winkelspiegels und Umsetzen des Lasers in die erforderliche Position, wird die zweite Achse fluchtend mit dem Reflektor vermessen. Dabei ist es wichtig, daß der Geradheitsreflektor nicht bewegt wird, da er als Bezugspunkt gilt und die optische Achse für die zweite Messung festlegt.

Bei den Rechtwinkligkeitsmessungen wurden die Vorzeichen nach den im Bedienungshandbuch aufgestellten Kombinationen festgelegt /8/.

7.1 Meßfehler

Alle Messungen können durch äußere Einflüsse, wie Luftturbulenzen, Maschinenvibrationen und Temperaturschwankungen beeinflusst werden. Dabei ist auch das Verhalten des Koordinatenmeßtisches auf Änderungen der Betriebs -und Umgebungsbedingungen wichtig.

Während der Messungen mißt deshalb ein Luftparameteraufnehmer, der sich so nah wie möglich an der Meßstrecke befinden soll, Lufttemperatur und Luftdruck. Die mittlere Werkstofftemperatur und der Ausdehnungskoeffizient des Materials der Achsen werden per Hand in das Anzeigegerät eingegeben, da keine entsprechenden Aufnehmer vorhanden sind. Die relative Luftfeuchte kann am Luftparameter eingestellt werden (25%, 50%, 75%).

Diese Einflußgrößen zählen zu den zufälligen Fehlern, die nur durch Wiederholungsmessungen eingegrenzt werden können.

Durch Mittelwertbildung läßt sich dann die mittlere Abweichung vom Mittelwert einer Meßreihe nach folgender Formel berechnen:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

Tabelle 1 zeigt die maximalen mittleren Fehler des Mittelwertes von allen Meßreihen.

Achse	Geradheit			
	vertikal μm	horizontal μm	Kippwinkel "	Schwenkwinkel "
x-Achse	$\pm 1,0$	$\pm 2,4$	$\pm 1,0$	$\pm 0,8$
y-Achse	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$
z-Achse	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$	$\pm 2,0$	$\pm 1,1$

Tabelle 1: Maximale mittlere Fehler des Mittelwertes

7.2 Einrichtungsverfahren

Der Fehler, der durch ungenaue oder falsche Anordnung der Meßgeräte (Laser, Interferometer, Reflektor) auftreten kann, läßt sich durch genaues Ausrichten und Justieren nach der Visiermethode kompensieren.

Bei dieser Methode wird mit Justierscheiben gearbeitet, die an den optischen Geräten angebracht werden.

Der Laserkopf wird so lange geschwenkt und verschoben, bis der Strahl entlang der gesamten Meßstrecke sowohl durch ein Loch in der Justierscheibe des Interferometers hindurchtritt als auch auf ein Fadenkreuz der Justierscheibe des Reflektors trifft /8/.

Weiterhin wird der Laserkopf leicht geschwenkt, bis der Meßwert auf der Anzeige ein Maximum erreicht. Es besteht dann keine Querkomponente mehr, die einen Kosinusfehler bewirken könnte, und der Strahl verläuft genau parallel zur Meßstrecke /8/.

Diese sogenannte Maximummethode wird nur bei der Streckenmessung angewendet, da sich bei den anderen Messungen keine Kosinusfehler ergeben.

Mit der Meßdurchführung kann dann begonnen werden, wenn das Einrichten und Justieren abgeschlossen sind und die Strahlstärke des reflektierten Meßstrahls immer einen maximalen Wert beibehält.

8. Meßergebnisse

8.1 Geradheit

Für die in den Diagrammen dargestellten Geradheitsabweichungen gelten folgende Vorzeichenregeln (Abb.19):

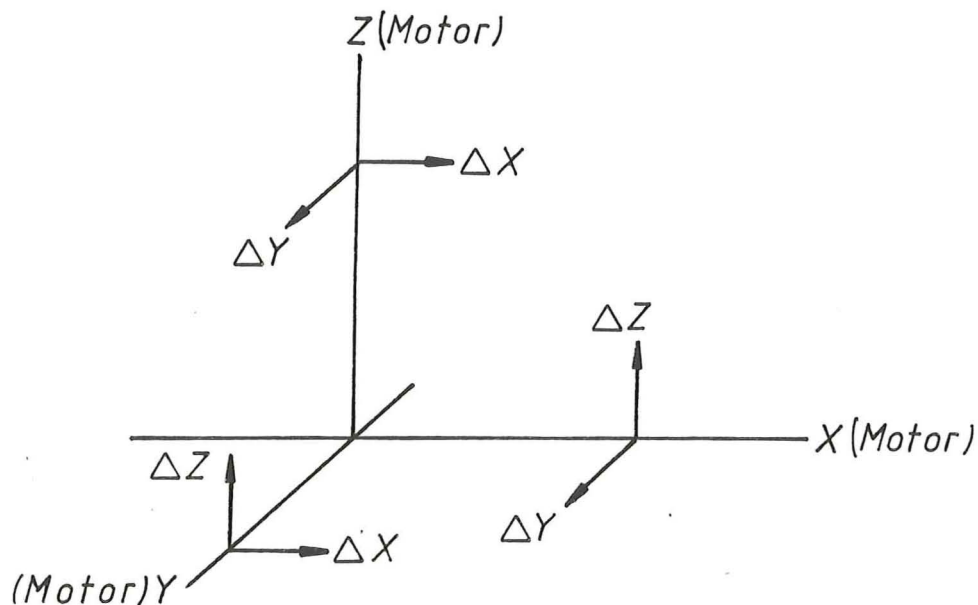


Abb.19: Vorzeichen der Geradheitsabweichungen

Die horizontalen und vertikalen Geradheitsabweichungen aller drei Achsen sind ausnahmslos kleiner als 0,013 mm (Abb.20-25). Ihr maximaler Einfluß auf die geforderte Positioniergenauigkeit von $\pm 0,05$ mm kann bestimmt werden, indem die maximalen Werte jeder Achse kombiniert werden.

Die Abweichungen von der Geradheit sind bei folgenden Positionen am größten:

x-Achse:	- 350 mm	$\Delta y = 0,013$ mm
		$\Delta z = -0,0038$ mm
y-Achse:	- 20 mm	$\Delta x = 0,0075$ mm
		$\Delta z = 0,0015$ mm
z-Achse:	- 60 mm	$\Delta x = 0,0024$ mm
		$\Delta y = -0,0018$ mm

Wird der Nullpunkt eines Koordinatensystems an dieser Sollposition definiert, dann gilt für die Koordinaten der wahren Position:

$$\Delta x_{\max} = 0,0075 \text{ mm} + 0,0024 \text{ mm} = 0,0099 \text{ mm}$$

$$\Delta y_{\max} = 0,013 \text{ mm} - 0,0018 \text{ mm} = 0,012 \text{ mm}$$

$$\Delta z_{\max} = 0,0015 \text{ mm} - 0,0038 \text{ mm} = -0,0023 \text{ mm}$$

Die Länge des Vektors zu diesem Raumpunkt liefert die Abweichung von der Sollposition:

$$\begin{aligned} |\vec{a}| &= \sqrt{\Delta x_{\max}^2 + \Delta y_{\max}^2 + \Delta z_{\max}^2} \\ &= \sqrt{0,0099^2 + 0,012^2 + 0,0023^2} \text{ mm} \\ &= \underline{0,015 \text{ mm}}. \end{aligned}$$

Die maximale Abweichung von der Sollposition beträgt also 0,015 mm und liegt bei der Position $x = -350 \text{ mm}$, $y = -20 \text{ mm}$ und $z = -60 \text{ mm}$.

Alle Geradheitsmessungen wurden dreimal wiederholt.

HORIZONTALE GERADHEIT DER X-ACHSE

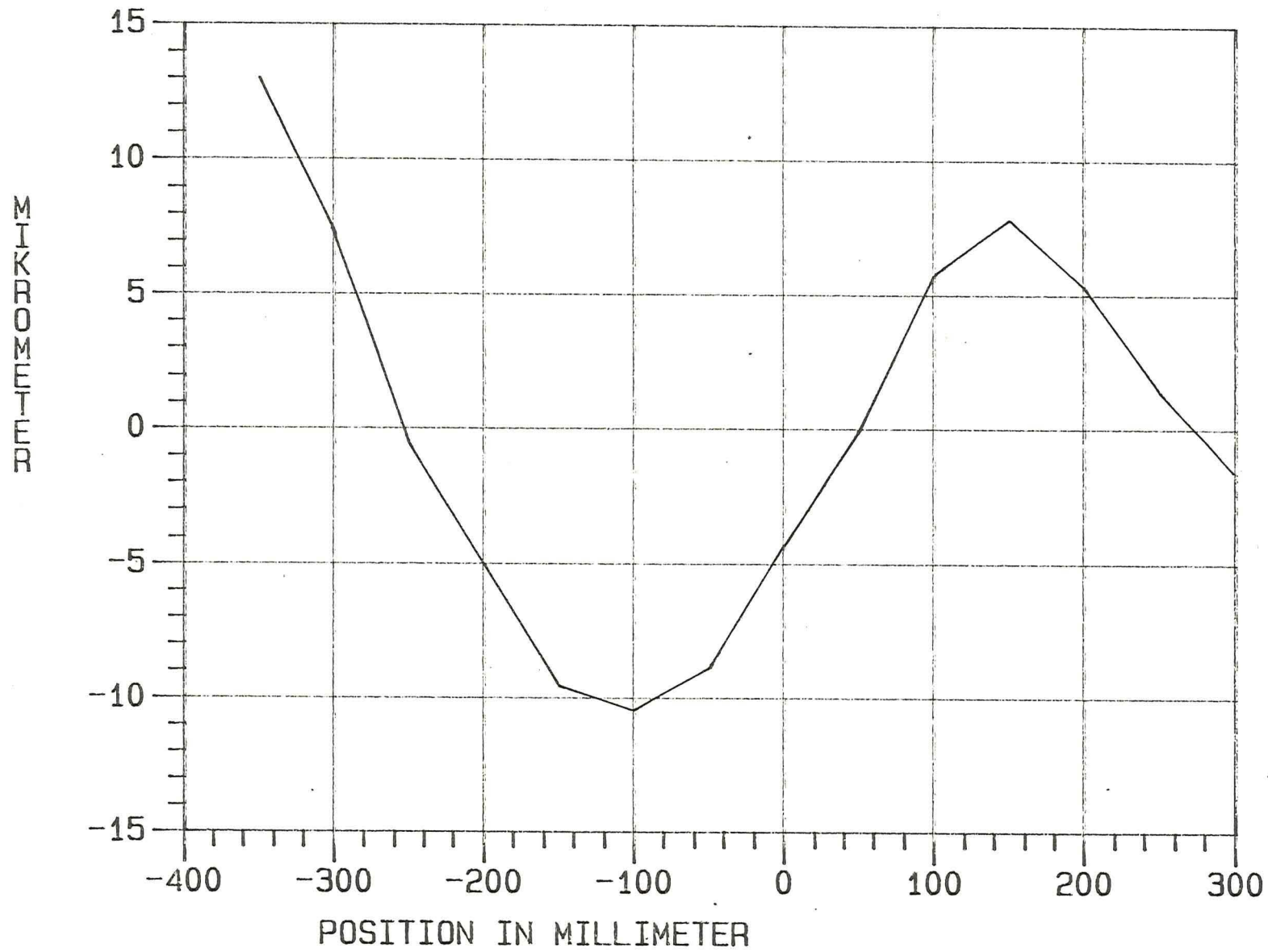


Abb.20: Horizontale Geradheit der x-Achse (Δy)

VERTIKALE GERADHEIT DER X-ACHSE

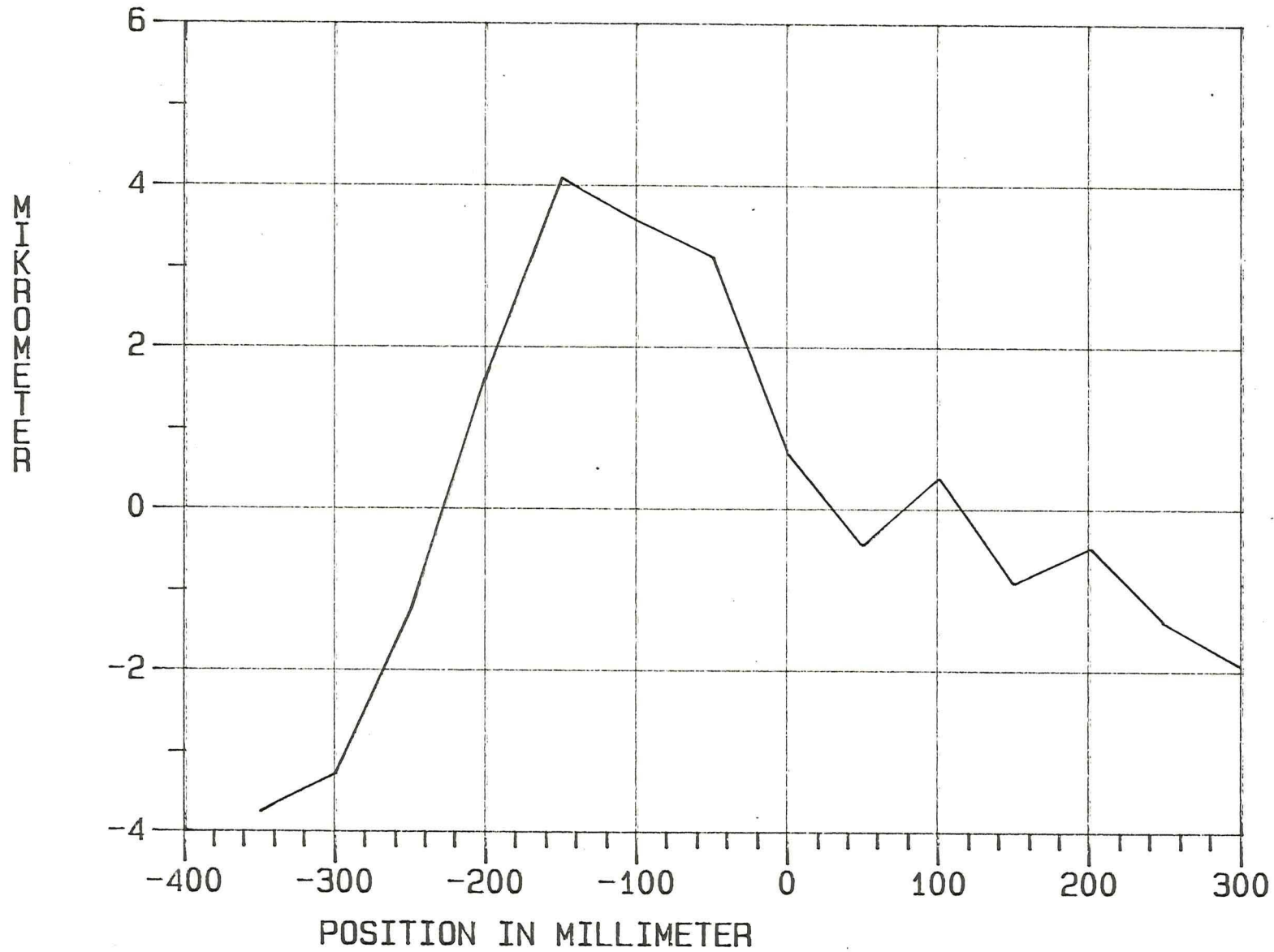


Abb.21: Vertikale Geradheit der x-Achse (Δz)

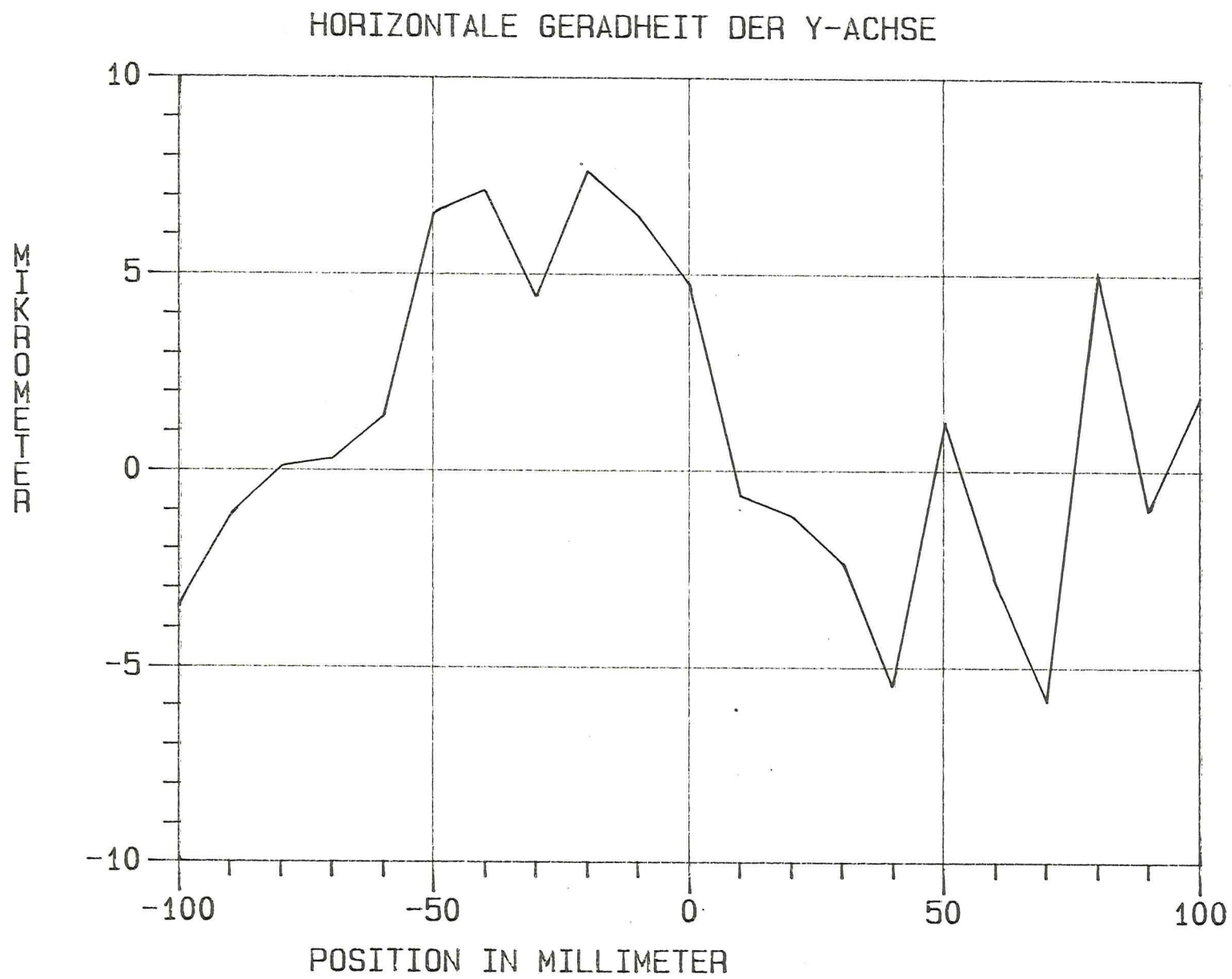


Abb.22: Horizontale Geradheit der y-Achse (Δx)

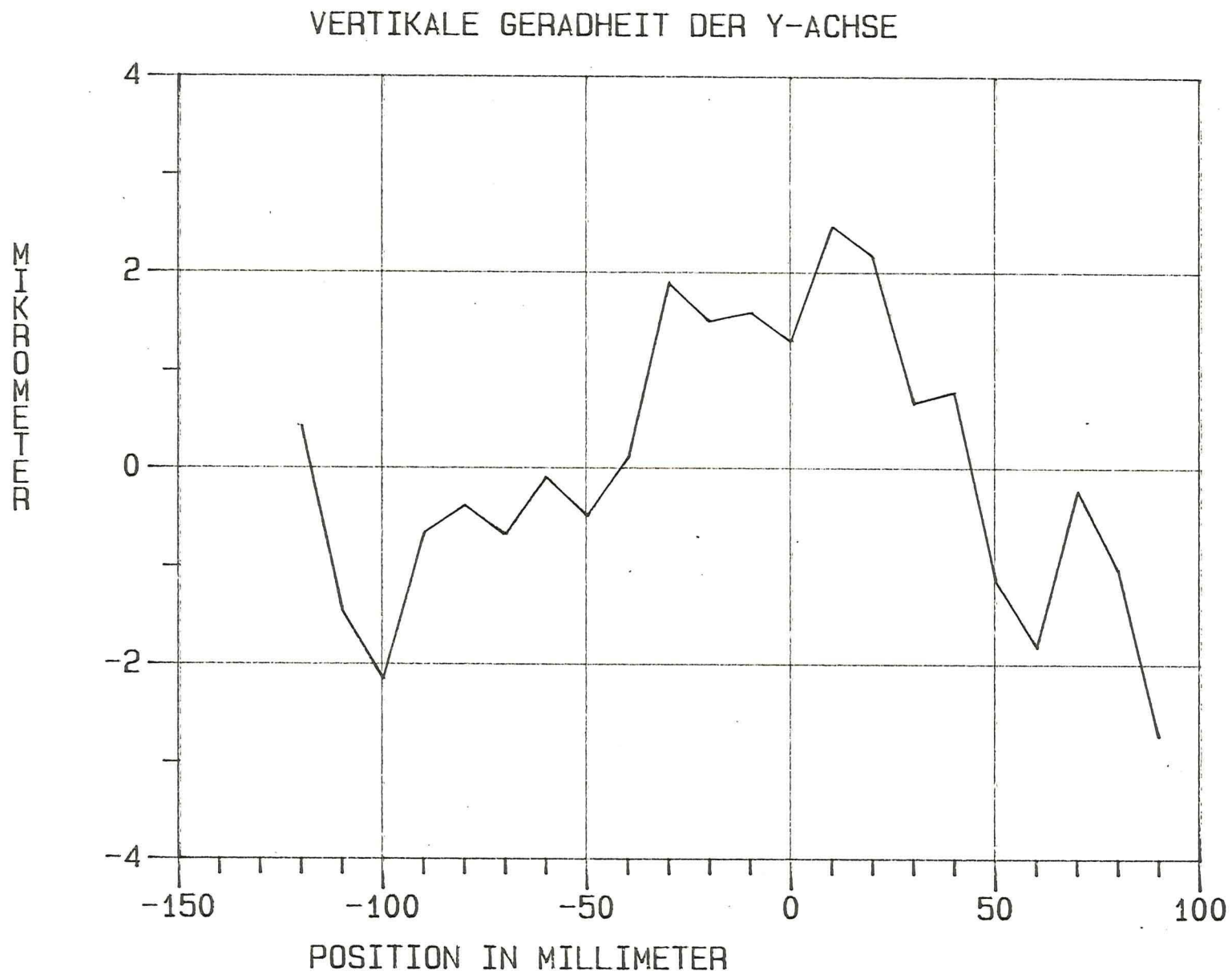


Abb.23: Vertikale Geradheit der y-Achse (Δz)

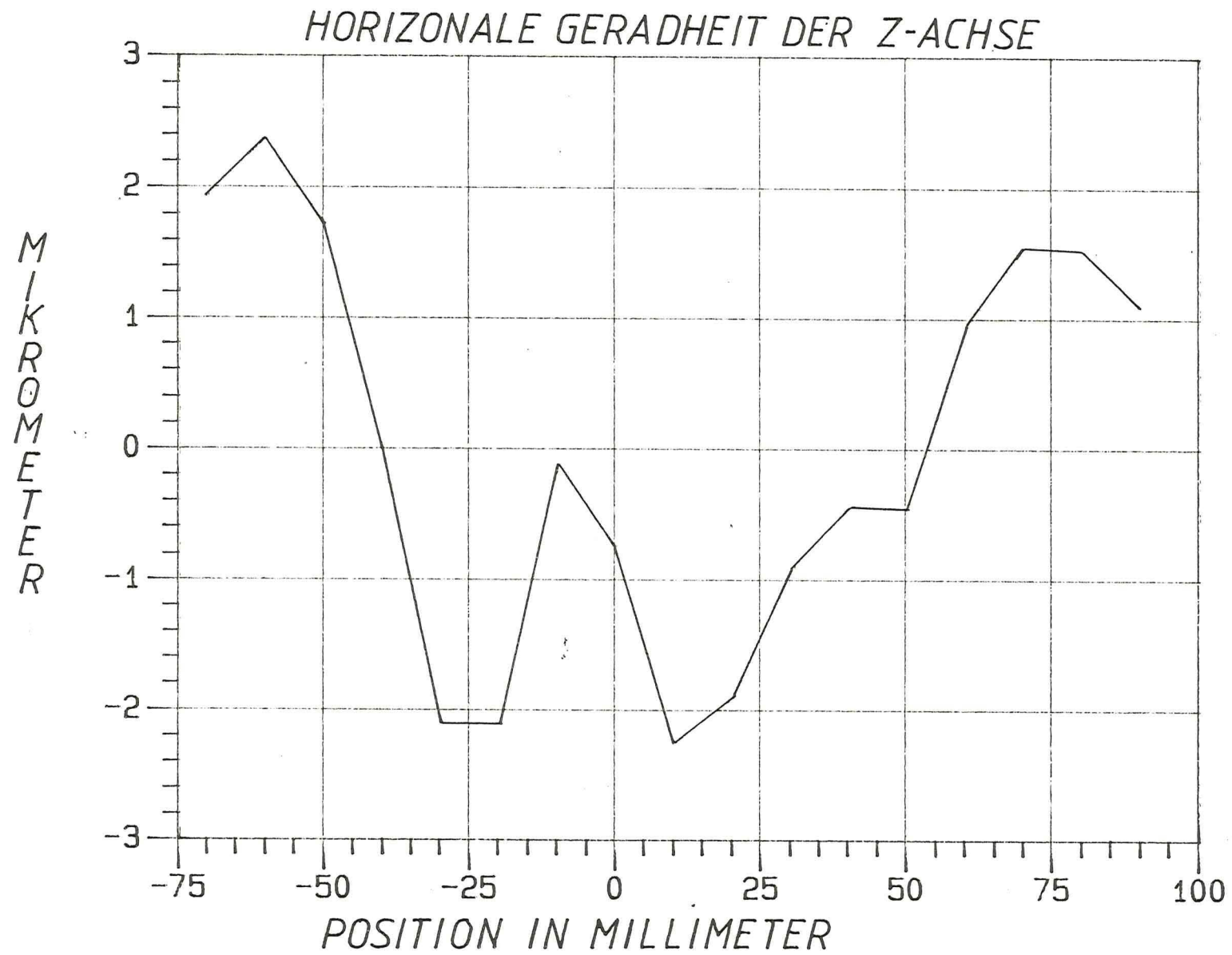


Abb.24: Horizontale Geradheit der z-Achse (Δx)

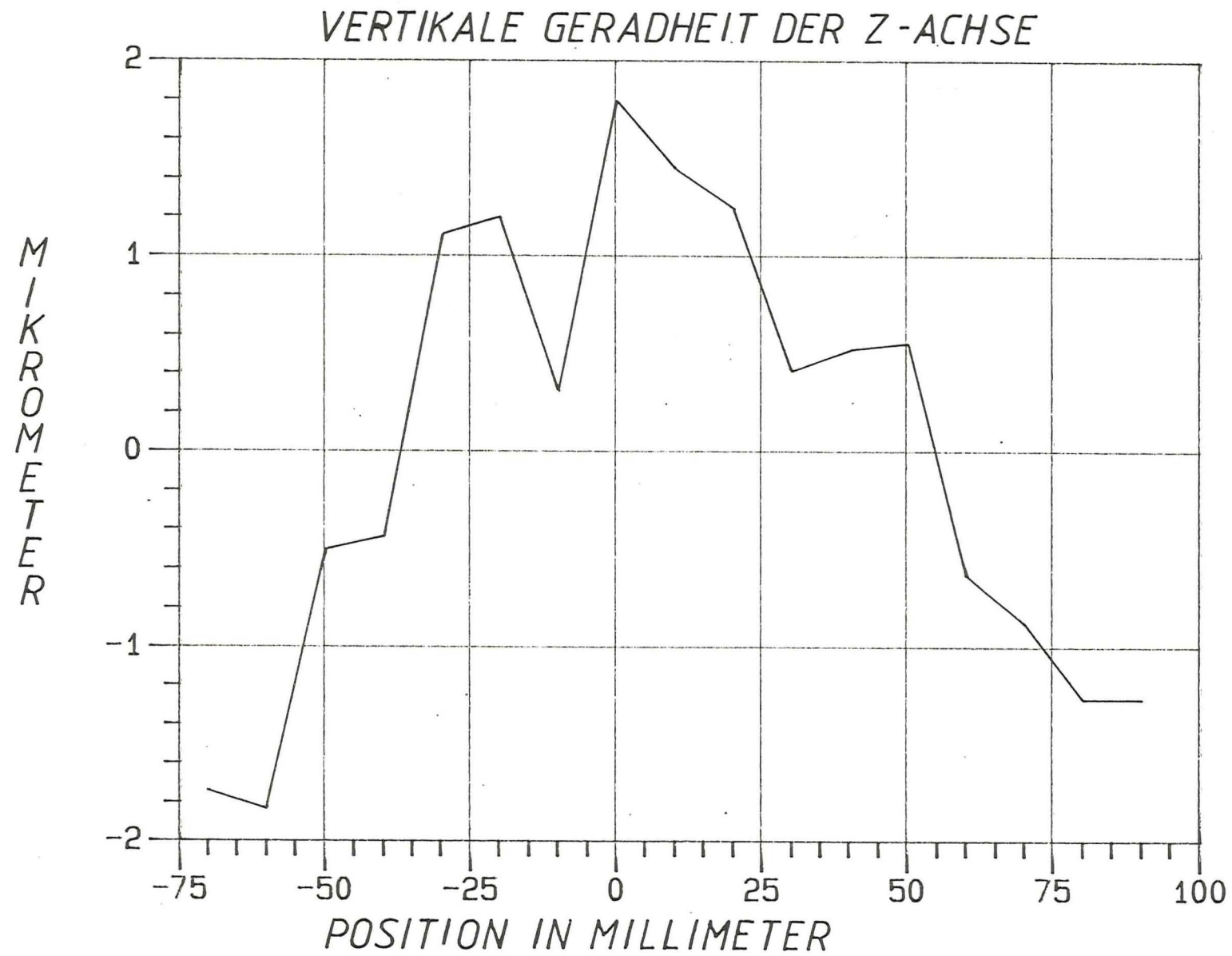


Abb.25: Vertikale Geradheit der z-Achse (Δy)

8.2 Winkelabweichungen

Bei den Ergebnissen der Winkelmessung ist es von Bedeutung, daß nur Winkeländerungen des fahrbaren optischen Gerätes relativ zum feststehenden registriert werden können. Eine absolute Messung, wie mit einer Wasserwaage, ist nicht möglich.

Der Winkel Null wird deshalb zu Beginn jeder Messung willkürlich festgelegt. Er wurde auf der x-Achse bei der negativen Endschalterposition und auf der y -und z-Achse bei der positiven definiert.

Die Richtungen, in die das bewegte optische Gerät gekippt und geschwenkt ist, gehen aus Abb.26 hervor.

Die in den Abb.27 - 32 dargestellten Winkelabweichungen lassen erkennen, daß sich die fahrbaren Komponenten der x bzw. z-Achse und die gesamte y-Achse auf annähernd parabelförmigen Bahnen bewegen.

Dieses läßt sich darauf zurückführen, daß die Lagerführungen der Achsen nicht exakt geradlinig hergestellt wurden.

Eine mechanische Kompensation dieser Winkelbewegungen ist deshalb nicht zu erreichen.

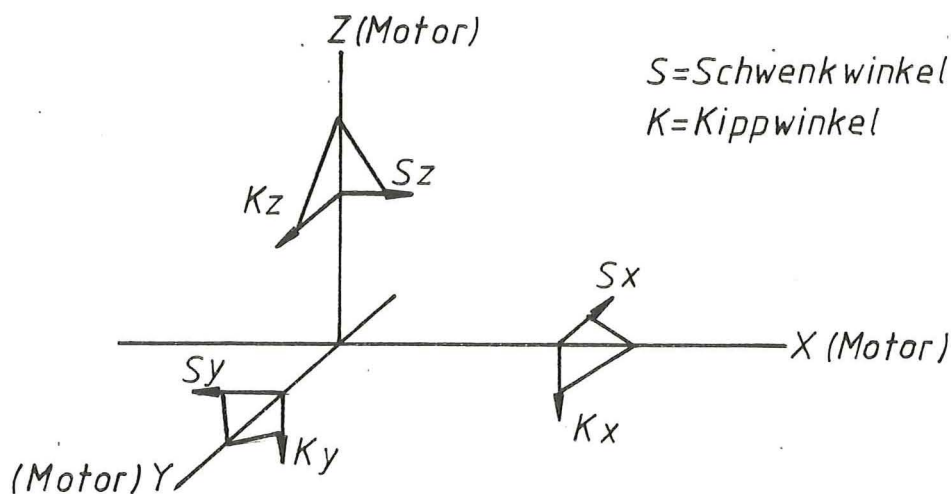


Abb.26: Richtungen der Winkelbewegungen

Die Pfeile in den Abb.27 - 32 bezeichnen die Fahrriichtung der Achsen während der Winkelmessungen.

Die Hallsonden werden mit einer ca. 2,0 m langen Stange, die am Schlitten der z-Achse festgeschraubt wird, in den Magneten hineingefahren. Das Ende der Stange mit der Meßsonde legt aufgrund der Winkelbewegungen der Achsen entsprechende Wege zurück.

Allein der Kippwinkel der x-Achse bewirkt eine Verschiebung der Meßsonde in der Vertikalen um ca. 0,2 mm:

$$22'' \cdot 0,005 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot 2,0 \text{ m} = \underline{0,22 \text{ mm}}$$

Einer Bogensekunde entsprechen $0,005 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$.

Die Kombination aller Winkelbewegungen gestattet die Annahme, daß der Positionsfehler zwischen 0,1 und 0,3 mm schwankt.

Alle Winkelmessungen wurden fünfmal wiederholt.

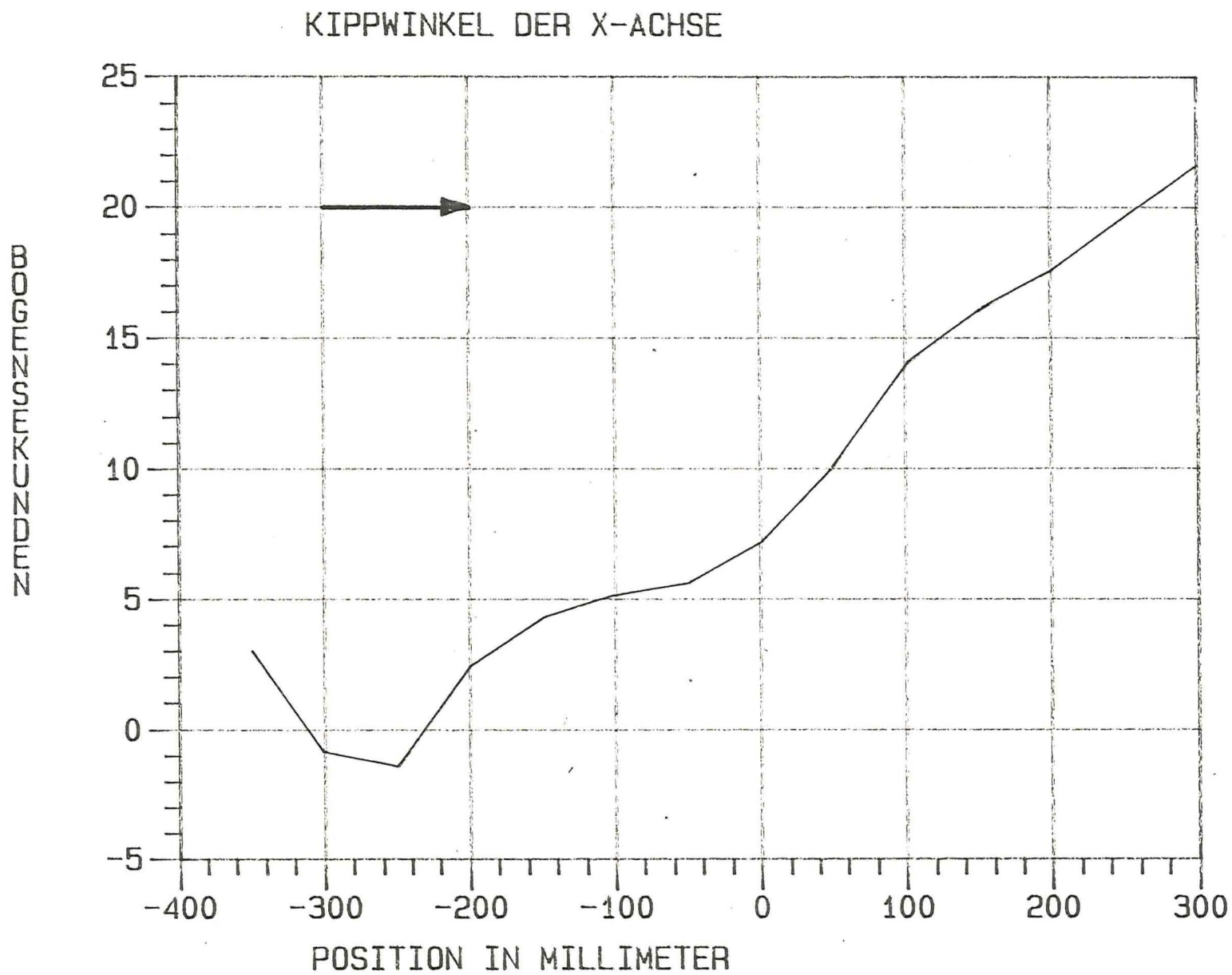


Abb.27: Kippwinkel der x-Achse (S_x)

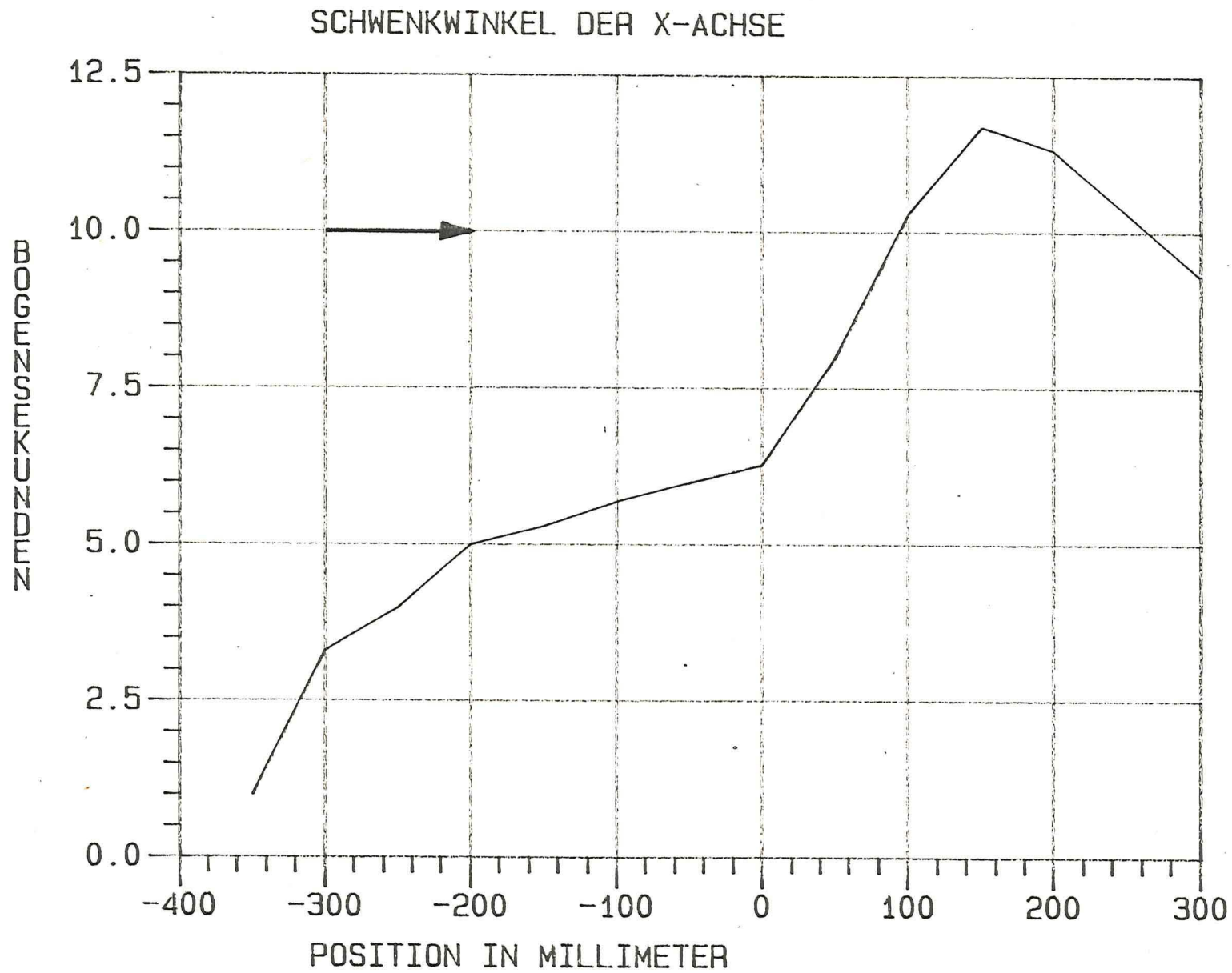


Abb.28 : Schwenkwinkel der x-Achse (Kx)

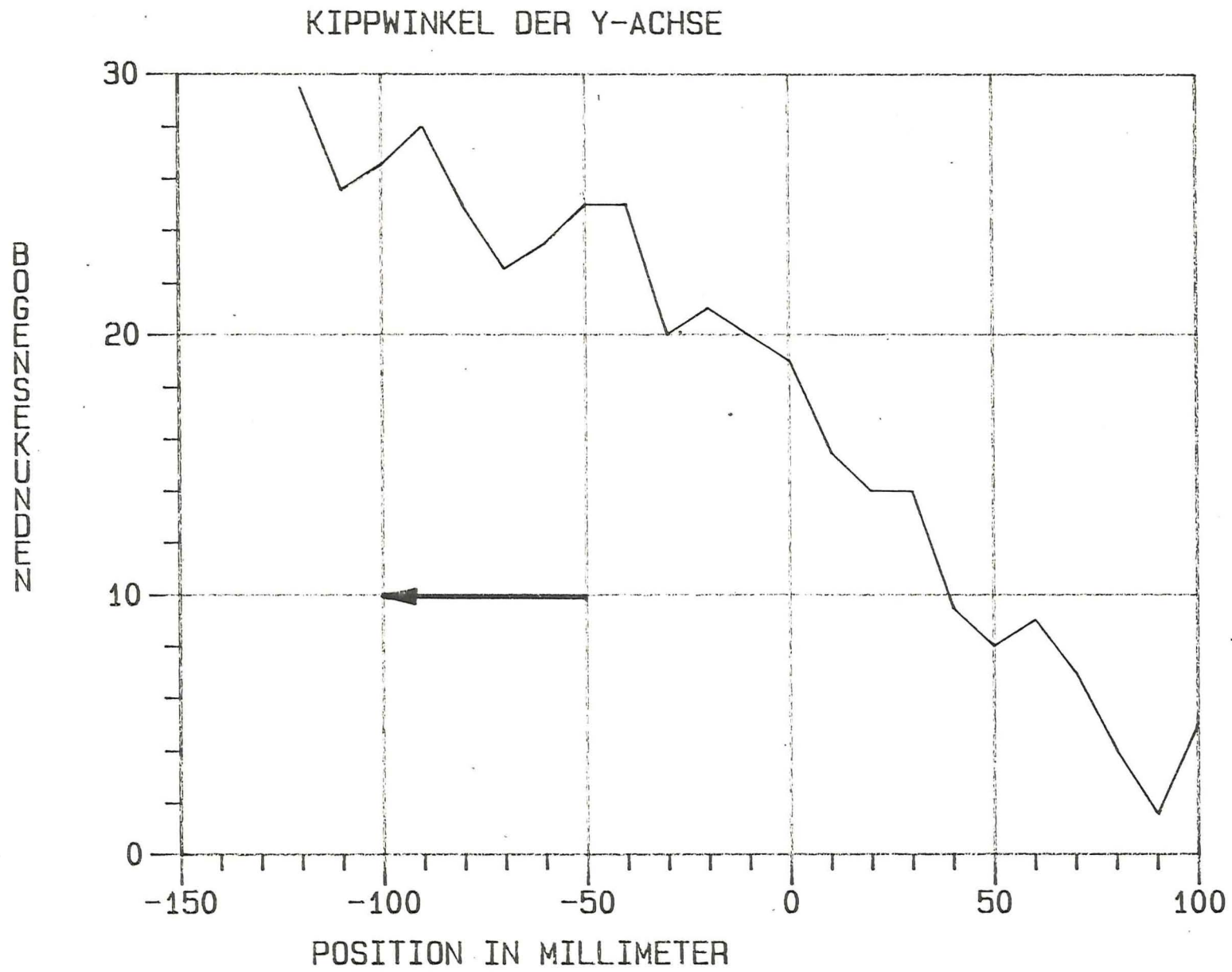


Abb.29: Kippwinkel der y-Achse (K_y)

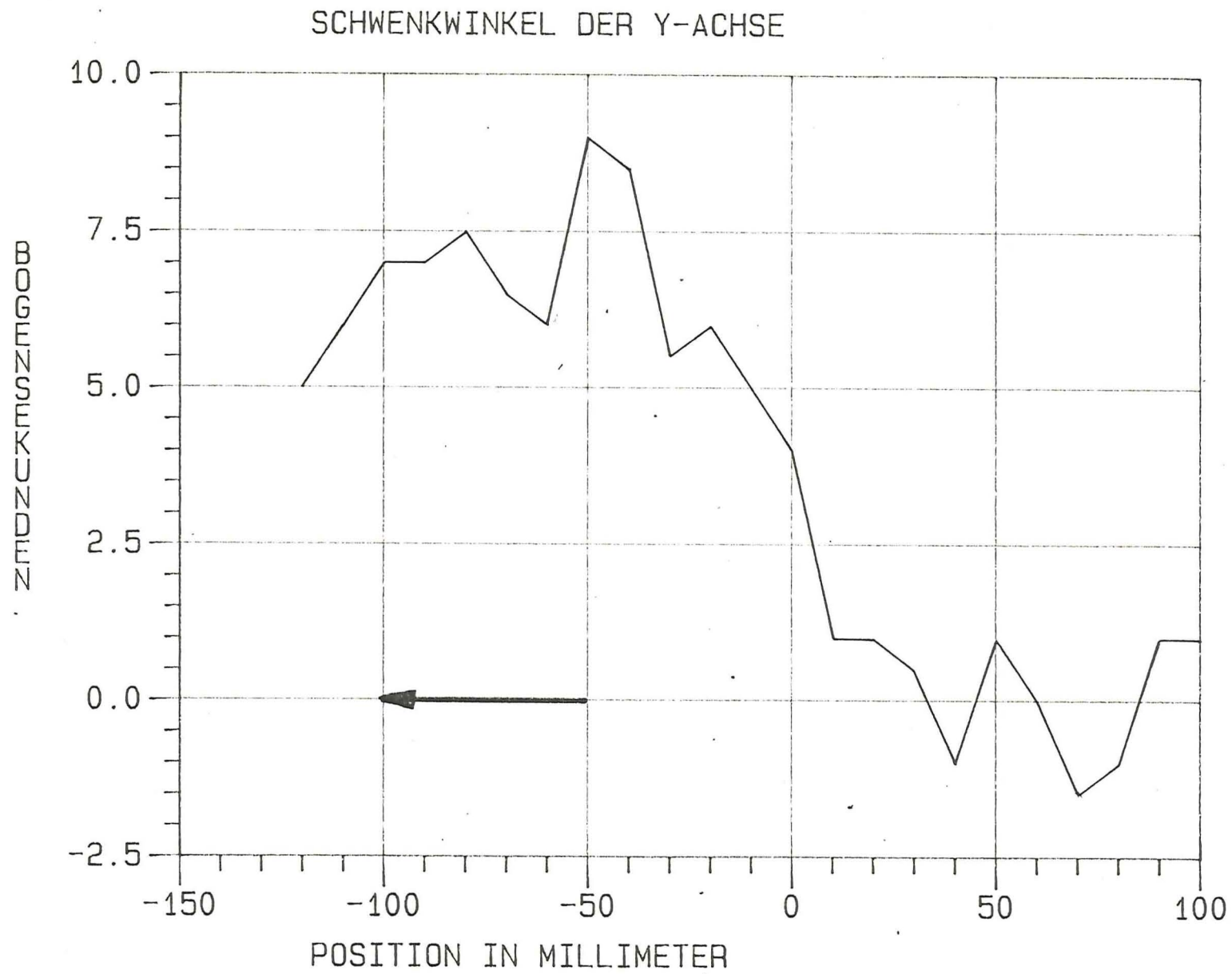


Abb.30: Schwenkwinkel der y-Achse (S_y)

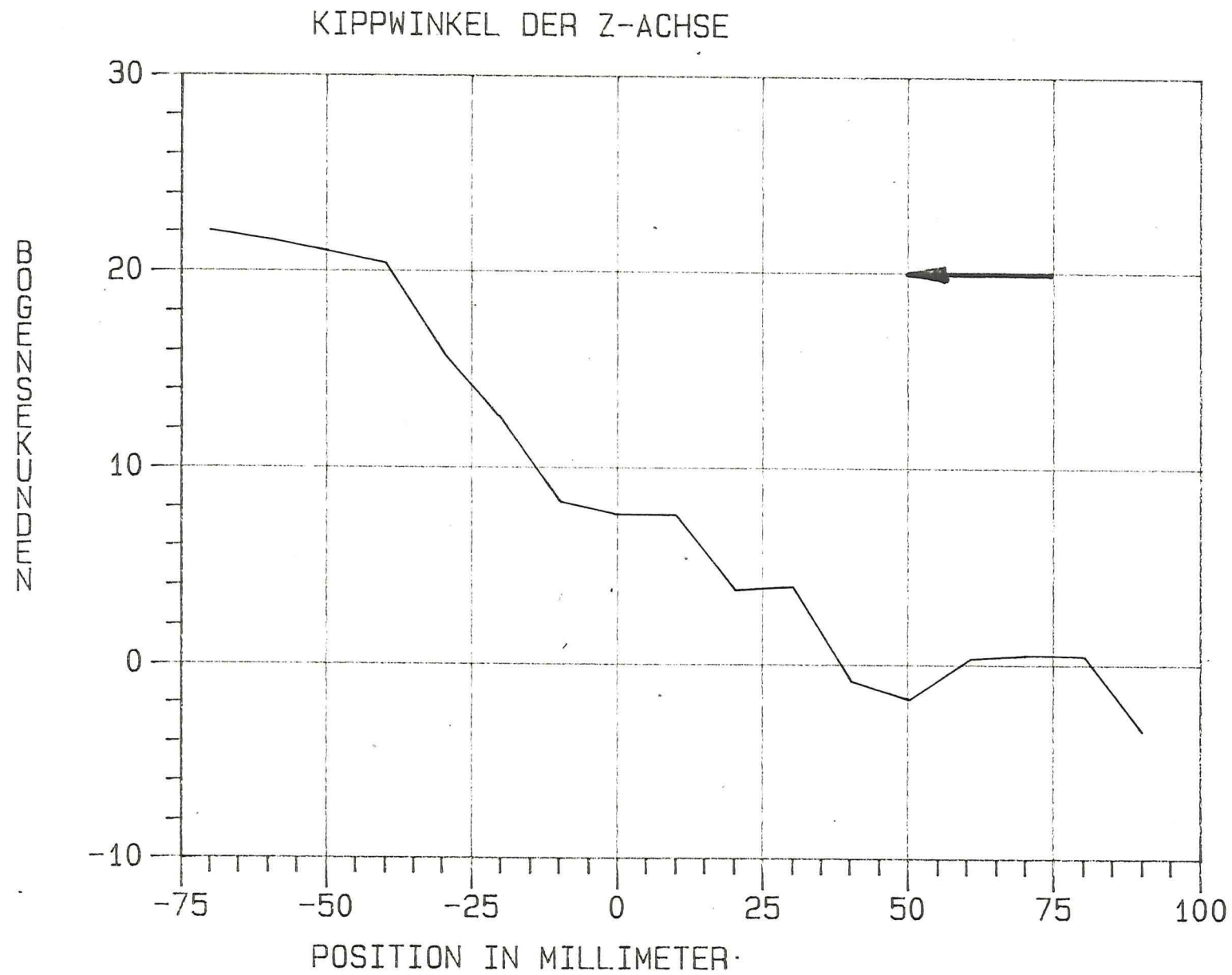


Abb.31: Kippwinkel der z-Achse (Kz)

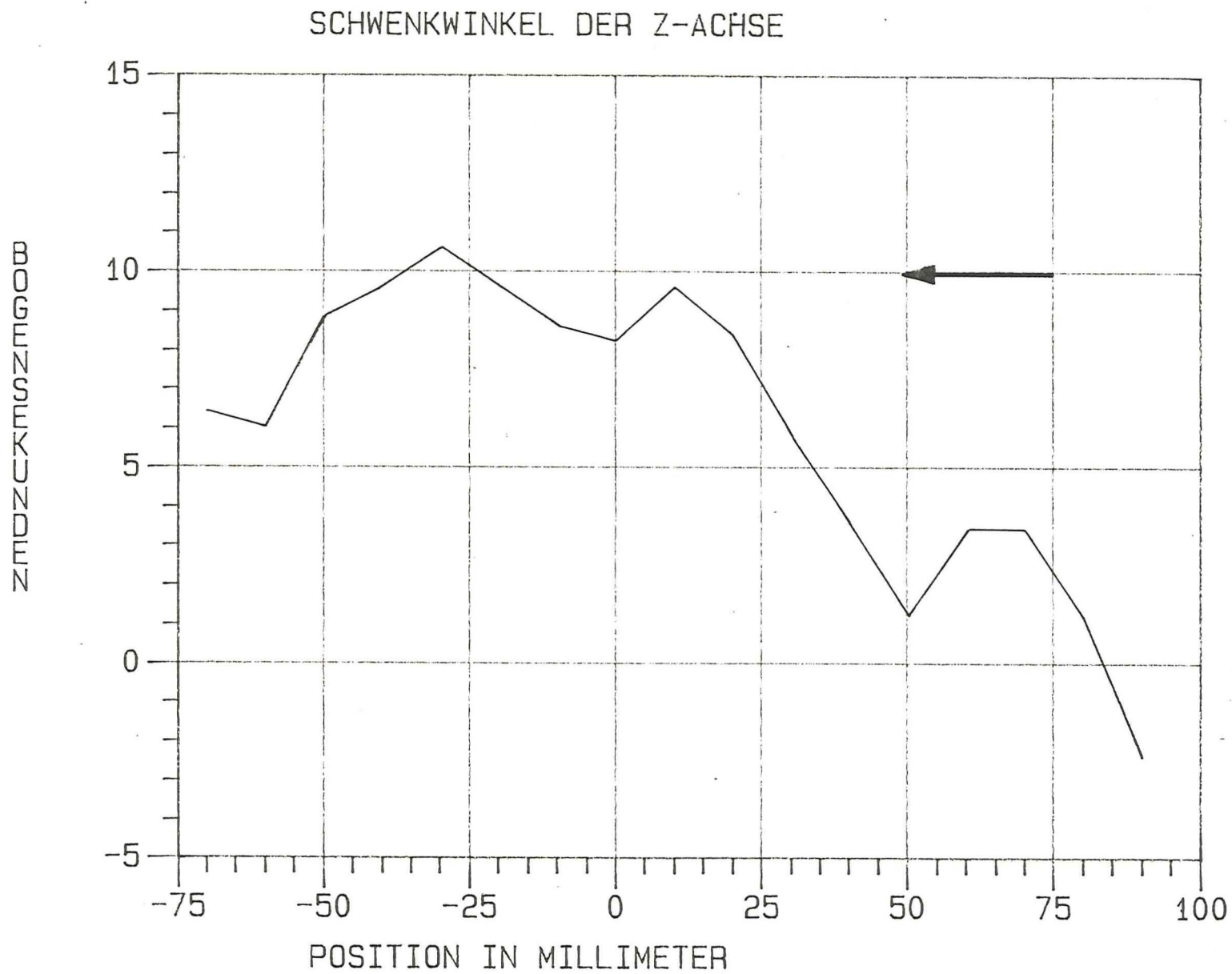


Abb.32: Schwenkwinkel der z-Achse (Sz)

8.3 Positionierungsunsicherheit

Die Abbildungen 33 - 35 zeigen die Abweichungen von den Sollpositionen, die mit dem Positioniercontroller vorgegeben worden sind.

Eingetragen sind die Mittelwerte aus mehreren Messungen für beide Anfahrrichtungen.

Aus den Meßwerten ergibt sich, daß die wahren Positionen mit einem maximalen Fehler von $\pm 0,01$ mm reproduzierbar angefahren werden können.

Es wird deutlich, daß die Genauigkeit der Positionierung durch Wechseln der Anfahrrichtung verbessert werden kann.

Die maximale Abweichung von der Sollposition ($x = -350$ mm, $y = -20$ mm, $z = -60$ mm) bei der Geradheit beträgt $0,015$ mm. Unter Berücksichtigung der Positionsunsicherheit, die bei diesen Achsenpositionen auftritt, ergibt sich eine Abweichung von $0,03$ mm $\pm 0,01$ mm.

Dieses Ergebnis kommt dem zulässigen Fehler bei der Positionierung der Meßsonde sehr nahe.

Die Überprüfung der Positioniergenauigkeit der x-Achse konnte nur in einer Fahrtrichtung stattfinden, da durch einen Defekt des Linearmaßstabes keine exakte Anzeige der Positionen dieser Achse mehr möglich war.

Eine Reparatur konnte nicht durchgeführt werden.

Die Anfahrrichtungen sind folgendermaßen festgelegt:

Werden die Sollpositionen im Diagramm von rechts angefahren, gilt die Kurve Nr. 1.

Die Kurve Nr. 2 gilt entsprechend für das Anfahren von links.

Letzteres gilt auch für die Kurve der x-Achse.

Alle Messungen zur Überprüfung der Positioniergenauigkeit wurden fünfmal wiederholt.

Positionierungsunsicherheit der x-Achse

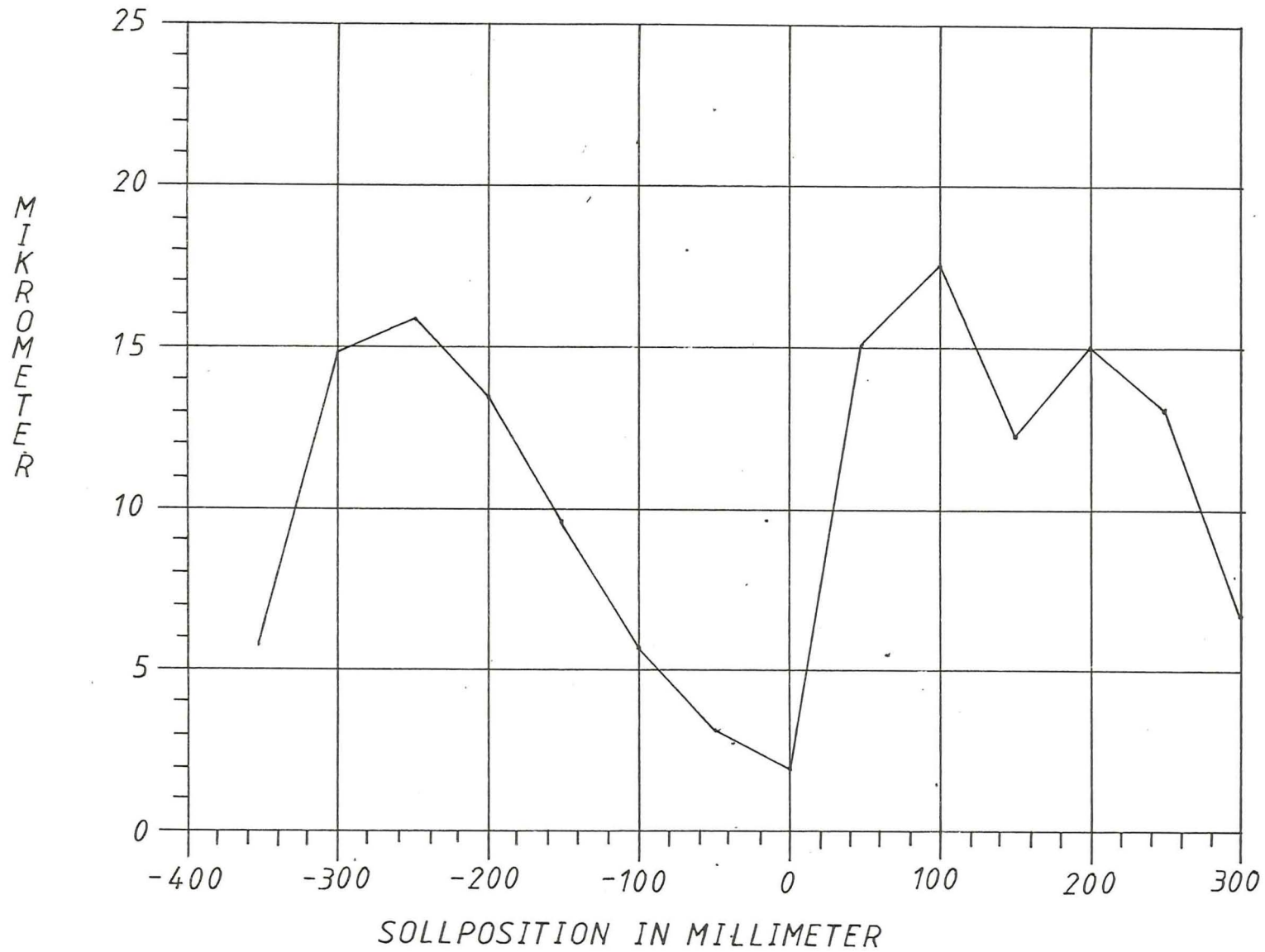


Abb.33: Positionierungsunsicherheit der x-Achse

POSITIONIERUNGSUNSICHERHEIT DER Y-ACHSE

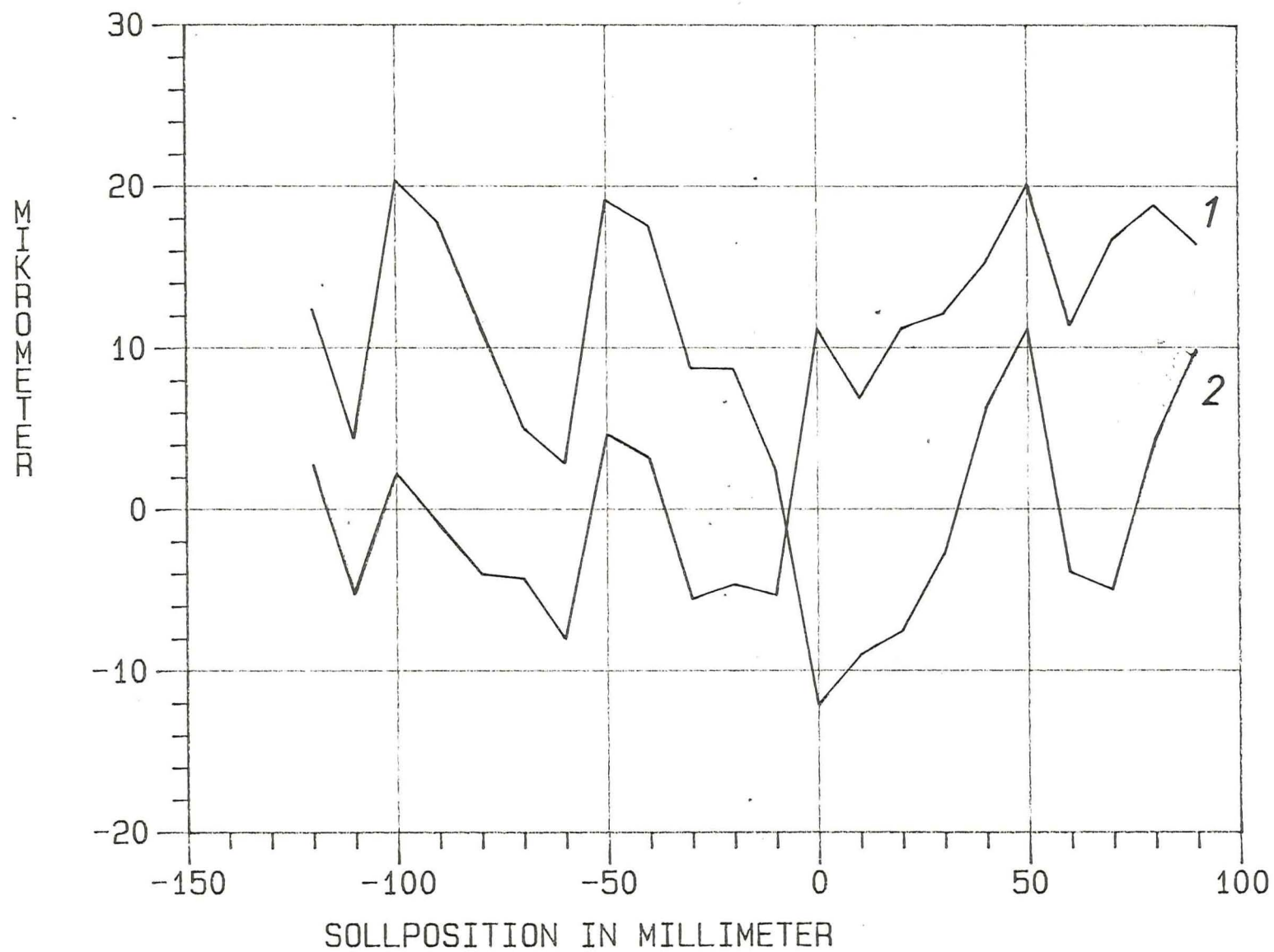


Abb.34: Positionierungsunsicherheit der y-Achse

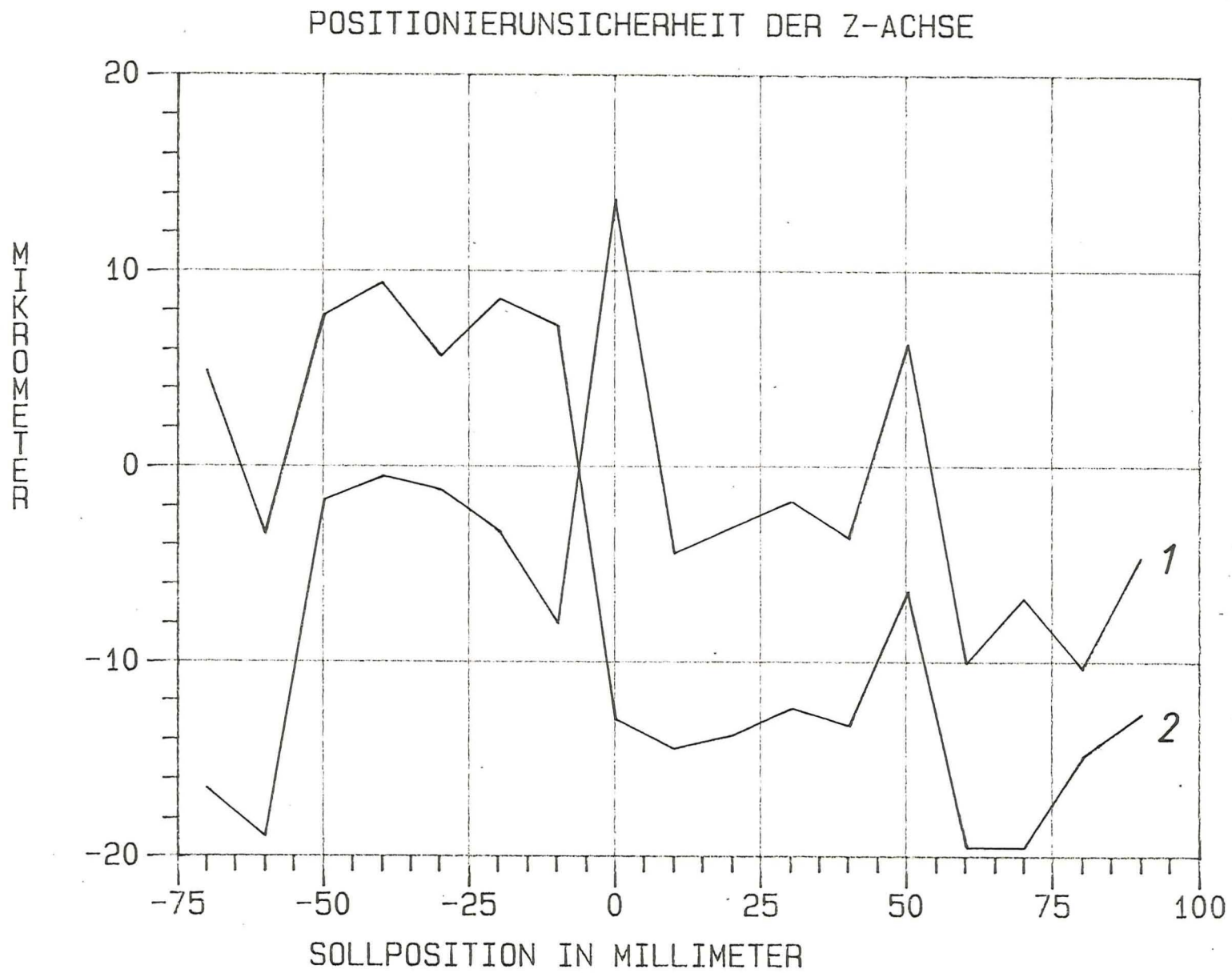


Abb.35: Positionierunsicherheit der z-Achse

8.4 Abweichung von der Rechtwinkligkeit

Die Rechtwinkligkeitsmessungen in den drei Ebenen brachten folgende Ergebnisse:

Achse	Gesamtwinkel	Abweichung von der Rechtwinkligkeit
x,z	$90^\circ + 8,5''$	$+ 8,5''$
x,y	$90^\circ - 1,0''$	$- 1,0''$
y,z	$90^\circ - 0,4''$	$- 0,4''$

Tabelle 2: Abweichung von der Rechtwinkligkeit

Die Abb.37 zeigt die Lagen der Gesamtwinkel in den drei Ebenen:

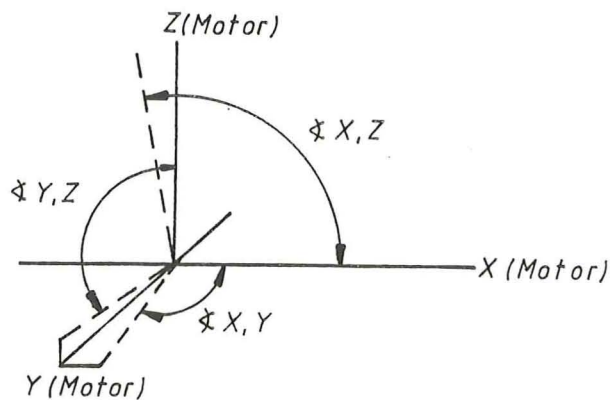


Abb.36: Gesamtwinkel mit Rechtwinkligkeitsabweichung

8.5 Zusätzliche Ergebnisse

Wird der Schlitten der x-Achse über die gesamte Fahrstrecke gefahren, findet eine Umverteilung der Last statt, die auf das Gestell des Tisches drückt. Dieser Lastwechsel verursacht eine Stauchung des Stahlgestells dort, wo die Granitplatte mit den Justierschrauben gelagert ist.

Aufgrund dieser Stauchung beträgt die Absenkung der Granitplatte auf der dem Motor der x-Achse abgewandten Seite ca. 0,02 mm/m. Da einer Bogensekunde 0,005 mm/m entsprechen, sind das 4,0".

Addiert man diesen Wert zum Kippwinkel der x-Achse, ergibt sich die Neigung des Schlittens relativ zum Boden.

Sie beträgt 25,6 Bogensekunden.

Zusätzlich zu den schon erwähnten Winkelbewegungen wurde folgendes festgestellt:

Der Schlitten der x-Achse neigt sich relativ zur Tischplatte, wenn die y-Achse ausgehend vom negativen Endschalter über die gesamte Fahrstrecke verfahren wird.

Die dem Motor der y-Achse zugewandte Seite des Schlittens sinkt nach unten ab.

Diese Winkelbewegungen zeigt Abb.37 für fünf verschiedene Stellungen des Schlittens der x-Achse. Es ist zu erkennen, daß die Neigung in der Mitte der x-Achse am größten ist und zu den Enden der Fahrstrecke der x-Achse hin geringer wird.

Dieses Verhalten kann seine Ursache darin haben, daß der Schlitten der x-Achse zwischen den Lagerschienen an den Enden der Fahrstrecke fester eingespannt ist als in der Mitte.

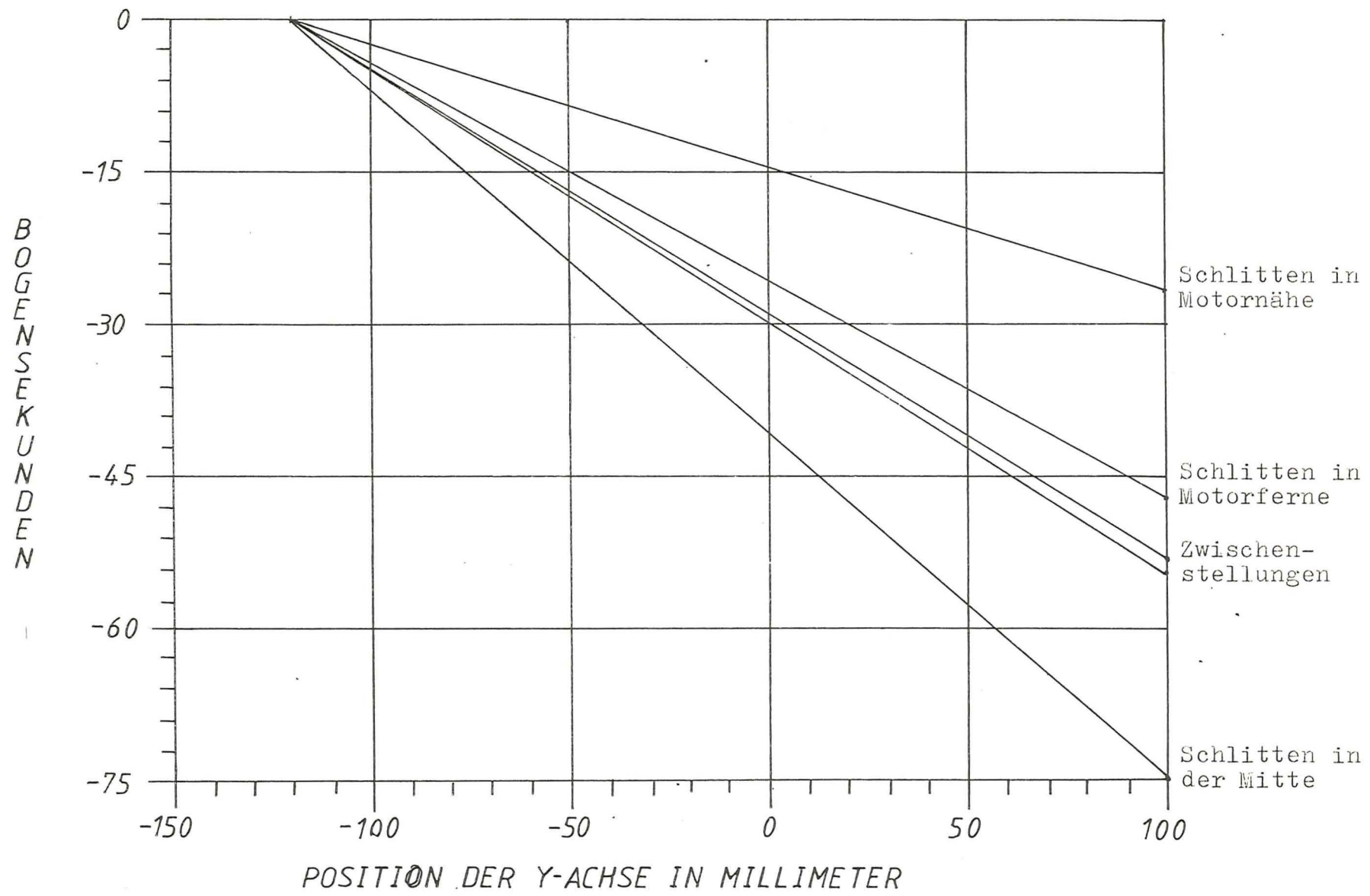


Abb.37: Neigung des Schlittens der x-Achse beim Fahren der y-Achse von -120 bis +100

9. Zusammenfassung

Die Zerlegung der komplexen Bewegungen des dreidimensionalen Koordinatenmeßtisches in einzelne Meßfaktoren und deren Vermessung gestatten einen guten Überblick über das statische Verhalten des Tisches.

Die alleinige Betrachtung der Geradheitsabweichungen und der Positionierungsunsicherheit ergibt einen maximalen Fehler der Positionierung von 0,04 mm. Der zulässige Fehler von 0,05 mm wird also schon bis zu 80% erreicht.

Einen weitaus größeren Einfluß auf die Positioniergenauigkeit der Meßsonde haben die Winkelbewegungen der Achsen. Die durch sie hervorgerufenen Positionsfehler liegen in der Größenordnung von $0,2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

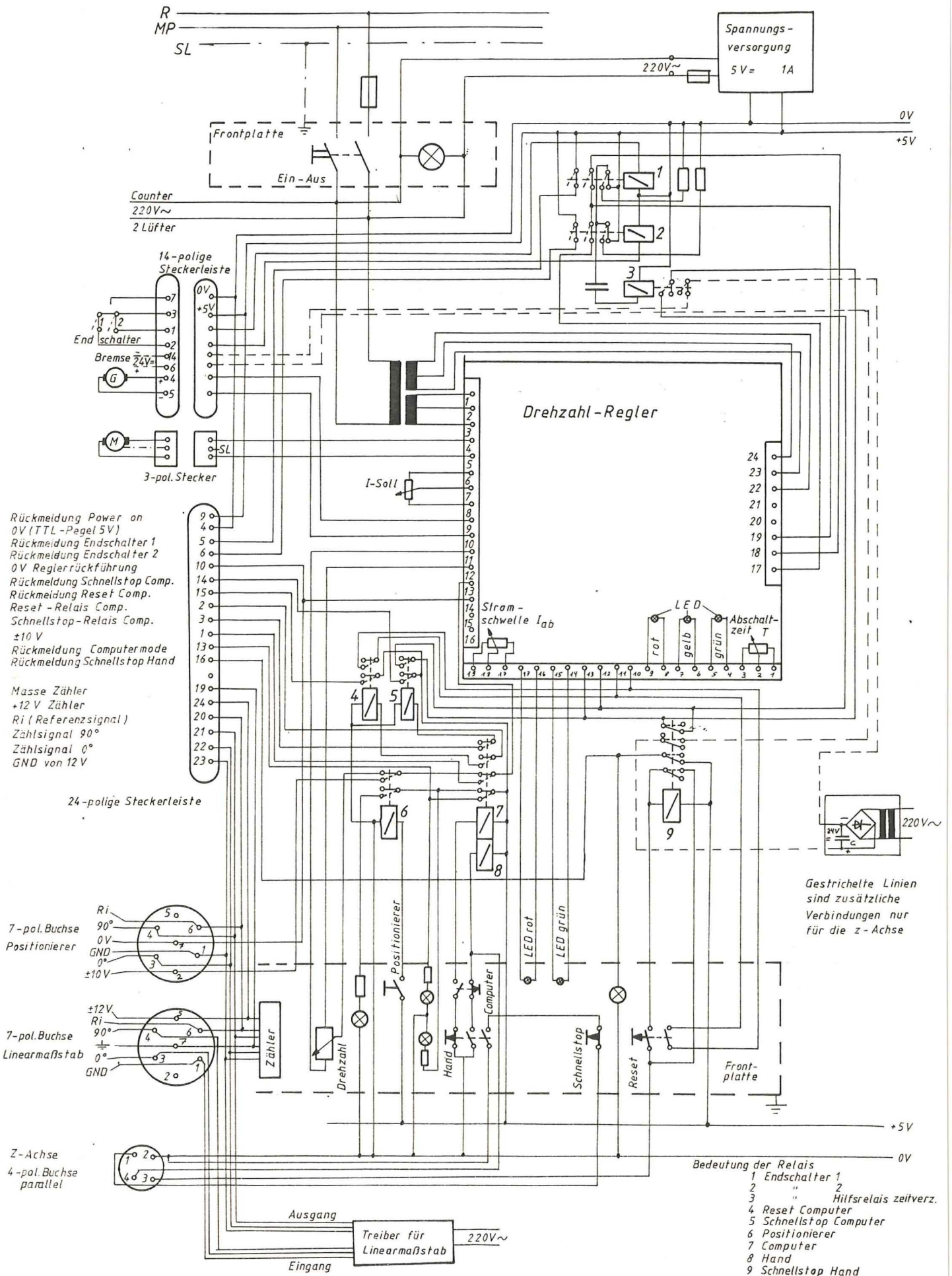
Die Berücksichtigung aller Meßfaktoren läßt den Schluß zu, daß die geforderte Positioniergenauigkeit von 0,05 mm nicht immer eingehalten werden kann.

Die Ungenauigkeiten der einzelnen Achsen sind ausnahmslos in deren Lagerung begründet und können deshalb nicht so einfach kompensiert werden.

Es ist demzufolge erforderlich, daß die Positionen der Magnetmeßprobe mit Hilfe des Prozeßrechners korrigiert werden müssen, damit die Voraussetzung für die Durchführung präziser Feldmessungen gegeben ist.

10. Anhang

Schaltplan der Steuerung des dreidimensionalen
Koordinatenmeßtisches mit Steckerbelegung



11. Literaturverzeichnis

- /1/ SNQ Projektbericht zum Abschluß von Phase B
(Definitionsphase), Februar 1984
- /2/ NC Längenmeßsysteme, Heidenhahn GmbH
- /3/ Mattke Antriebstechnik, Gleichstrom-Antriebe
und Zubehör, Ausgabe H
- /4/ Mattke Drehzahlregler, Beschreibung und Inbetrieb-
nahme
- /5/ Fachlexikon ABC Physik, Band 1 und 2, Verlag Harri
Deutsch, Zürich und Frankfurt a. Main, 1974
- /6/ Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik,
Band III Optik, Walter de Gryter, Berlin 1978,
7. Auflage
- /7/ H.Weber, G.Herziger, Laser-Grundlagen und Anwendungen,
1. Auflage 1972, Physik Verlag 1978
- /8/ Laser Measurement System 5528A, User's Guide,
Hawlett-Packard Company 1982, Manual Part Number
05528-90003
- /9/ Brenneke-Schuster, Physik, Vieweg Verlag Braunschweig
1974, 3. Auflage
- /10/ Rudolf Schetzke, Vermessung der dynamischen Eigen-
schaften eines dreiachsigen Koordinatenmeßtisches
Fachhochschule Aachen, Abt. Jülich 1985
- /11/ Multiprogrammer Model 6942A, Installation and
Assembly Level Service Manual, Hewlett Packard
Company 1981

